



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина

**Строительный институт**

**А. В. НЕКРАСОВ**

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**А. В. Некрасов**

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*Рекомендовано учебно-методическим советом УрФУ  
в качестве **учебного пособия** для студентов,  
обучающихся по программам магистратуры  
направления 270800 – Строительство*

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2014

УДК 532.542:004.94(075.8)  
ББК 22.253.3с51я73+38.761.1с51я73  
Н48

Рецензенты:

кафедра "сельскохозяйственных" машин УрГСХА (завкафедрой  
канд. техн. наук проф. А. Н. Зеленин);  
канд. техн. наук проф. кафедры «Мехатроника» Уральского  
государственного университета путей сообщения В. М. Таугер

Научный редактор – канд. хим. наук доц. Ю. В. Аникин

**Некрасов, А. В.**

Н48 Компьютерное моделирование гидродинамических  
процессов систем водоснабжения : учеб. пособие /  
А. В. Некрасов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. –  
312 с.  
ISBN 978-5-7996-1114-9

В пособии рассматривается методика решения основных гидродинамических задач, возникающих при математическом моделировании работы распределительных сетей водоснабжения в стационарных и переходных режимах с использованием программ WaterGEMS и Hammer фирмы Bentley.

Пособие предназначено для студентов-магистрантов, обучающихся по направлению «Водоснабжение и водоотведение», а также для специалистов предприятий «Водоканал».

Библиогр.: 7 назв. Табл. 18. Рис. 444.

УДК 532.542:004.94(075.8)  
ББК 22.253.3с51я73+38.761.1с51я73

ISBN 978-5-7996-1114-9

© Уральский федеральный  
университет, 2014

# Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Основные понятия гидравлики .....</b>	<b>15</b>
1.1. Физические свойства жидкостей .....	15
1.2. Давление .....	17
1.3. Расход .....	20
1.3. Баланс механической энергии при движении жидкости ....	22
1.4. Потери напора по длине трубопровода .....	26
1.5. Потери напора в местных сопротивлениях .....	27
1.6. Система уравнений гидравлической сети .....	28
1.7. Нестационарное движение жидкости.....	31
<b>2. Построение схемы сети и ее гидравлический расчет .....</b>	<b>34</b>
2.1. Запуск программы WaterGEMS и начальные настройки...34	
2.2. Установка фоновой заливки .....	36
2.3. Построение схемы сети.....	37
2.4. Ввод и редактирование параметров элементов сети.....	40
2.4.1. Резервуар .....	41
2.4.2. Резервуар с регулируемым уровнем .....	42
2.4.3. Насос .....	43
2.4.4. Редукционный клапан .....	47
2.4.5. Узлы сети .....	48
2.4.6. Трубопроводы .....	49
2.5. Гидравлический расчет сети в стационарном режиме.....	53
2.6. Просмотр результатов расчета.....	54
2.7. Построение графиков изменения параметров потока по его длине .....	57
<b>3. Анализ работы сети при изменении ее параметров во     времени .....</b>	<b>59</b>
3.1. Графики водопотребления .....	59
3.2. Гидравлический расчет сети в режиме EPS .....	64
3.3. Сценарии и альтернативы .....	66
3.3.1. Создание новой альтернативы потребления.....	67
3.3.2. Создание и редактирование дочернего сценария.....	69
3.3.4. Физическая альтернатива.....	71
<b>4. Импорт данных .....</b>	<b>75</b>



4.1. Принципы импортирования данных различных типов .....	75
4.1.1. Импорт текстовых данных, электронных таблиц и баз данных .....	75
4.1.2. Графические данные.....	78
4.1.3. Файлы ГИС.....	81
4.2. Импорт данных в среде WaterGEMS.....	83
4.3. Использование сетевого навигатора .....	90
4.3.1. Поиск труб, проходящих рядом с узлами, которые им не принадлежат.....	90
4.3.2. Поиск близко расположенных узлов .....	91
4.3.3. Поиск изолированных узлов.....	92
<b>5. Упрощение схемы сети.....</b>	<b>93</b>
5.1. Цель и принципы упрощения расчетной схемы .....	93
5.2. Виды упрощений.....	95
5.3. Упрощение схемы сети в среде WaterGEMS .....	99
5.3.1. Исходная схема .....	99
5.3.2. Удаление труб по условию .....	104
5.3.3. Удаление тупиков, объединение последовательных и параллельных участков .....	107
5.3.4. Результаты упрощения схемы .....	112
<b>6. Расчет узловых отборов .....</b>	<b>113</b>
6.1. Способы учета водопотребления.....	113
6.2. Методы расчета узловых отборов.....	114
6.3. Определение границ зон обслуживания узлов .....	118
6.4. Расчет узловых отборов в среде WaterGEMS .....	120
6.4.1. Предварительные действия. Шейп-файл .....	121
6.4.2. Принципы использования LoadBuilder .....	126
6.4.3. Сравнение методов расчета отборов.....	135
<b>7. Гидравлическая калибровка модели .....</b>	<b>144</b>
7.1. Виды калибровки .....	144
7.2. Причины неадекватности модели сети.....	146
7.2.1. Ошибки ввода (импорта) схемы.....	147
7.2.2. Отклонения фактических диаметров труб от принятых при расчете.....	148
7.2.3. Ошибки значений узловых отборов .....	149
7.3. Принципы калибровки сети с использованием генетических алгоритмов .....	150

7.4. Калибровка сети в среде WaterGEMS .....	153
7.4.1. Постановка задачи .....	153
7.4.2. Принципы использования Darwin Calibrator .....	155
7.4.3. Ручная калибровка.....	164
7.4.4. Автоматический подбор сопротивлений труб.....	167
7.4.5. Автоматический подбор узловых отборов .....	169
7.4.6. Экспорт результатов расчетов в модель.....	173
7.4.7. Сравнение результатов оптимизации .....	174
<b>8. Анализ потребления энергии .....</b>	<b>175</b>
8.1. Постановка задачи .....	175
8.2. Нерегулируемые насосы и водонапорная башня.....	180
8.3. Нерегулируемые насосы без водонапорной башни.....	186
8.4. Использование регулируемого насоса .....	190
8.5. Анализ энергопотребления .....	193
8.6. Сравнение вариантов управления насосами .....	197
<b>9. Проектирование сети с помощью Darwin Designer .....</b>	<b>198</b>
9.1. Постановка задачи .....	198
9.2. Подбор диаметров трубопроводов .....	199
9.3. Определение диаметров с помощью Darwin Designer .....	204
9.4. Многокритериальный анализ.....	212
<b>10. Моделирование изменения качества воды .....</b>	<b>216</b>
10.1. Основные принципы моделирования качества воды.....	216
10.2. Моделирование качества воды в среде WaterGEMS.....	221
10.2.1. Постановка задачи .....	221
10.2.2. Моделирование процесса смешения потоков воды..	222
10.2.3. Моделирование процесса смешения с уточненными начальными условиями.....	228
10.2.4. Расчет изменения концентрации веществ при химических реакциях.....	231
10.2.5. Возраст воды .....	236
10.2.6. След источника .....	240
10.2.7. Сравнение результатов расчетов.....	243
<b>11. Анализ работы сети при отключении ее сегментов .....</b>	<b>244</b>
11.1. Постановка задачи .....	244
11.2. Сегментация схемы сети .....	246
11.3. Поиск выпускных сегментов .....	250

11.4. Критические сегменты .....	251
11.5. Улучшение схемы.....	252
<b>12. Моделирование переходных процессов в простом трубопроводе.....</b>	<b>256</b>
12.1. Создание расчетной модели в среде Hammer .....	256
12.2. Ввод параметров расчета .....	264
12.3. Расчет гидравлического удара .....	267
12.4. Представление результатов в графическом виде и их анализ .....	270
12.5. Влияние времени закрытия клапана на силу гидравлического удара .....	275
<b>13. Средства защиты от гидроудара .....</b>	<b>278</b>
13.1. Использование гидропневматического аккумулятора ...	278
13.2. Упреждающий клапан .....	284
13.3. Демпфирующий клапан.....	288
13.4. Водонапорная колонна .....	291
<b>14. Переходные процессы в гидравлической сети.....</b>	<b>297</b>
14.1. Постановка задачи и расчет начальных условий .....	297
14.2. Расчет распространения волны давления .....	302
<b>Библиографический список .....</b>	<b>309</b>

---

## Введение

Сети водоснабжения являются частью инфраструктуры любого более или менее крупного населенного пункта. Можно сказать без преувеличения, что их бесперебойное функционирование жизненно важно.

Проблемы, с которыми сталкиваются сейчас муниципальные службы водоснабжения и водоотведения (предприятия «Водоканал») многих городов, сходны: сильный физический износ трубопроводов сетей, острая нехватка средств на их реконструкцию и ремонт, дефицит водных ресурсов, ухудшение качества поверхностных вод и т. д.

Достаточно типичной становится ситуация, когда из-за повышенной вероятности разрыва трубопроводов диспетчерские службы не могут повышать давление в сетях. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению водоснабжения потребителей, расположенных на возвышенных местах и в районах высотной застройки.

Многие сети водоснабжения включают сотни трубопроводов и потребителей. Подача воды часто осуществляется из нескольких источников. Сами сети фактически работают в условиях нерегулируемого водопотребления, сопровождающегося циклическими изменениями. При этом необходимо обеспечение гарантированного водоснабжения потребителей при возможных пиковых нагрузках, при любых отказах элементов системы, а также обеспечение экономически целесообразных режимов работы системы в периоды малых нагрузок.

Приведенные примеры демонстрируют не только разнообразие проблем, которые должны решать службы «Водоканал», но и их исключительную сложность. Принятие обоснованных технических решений по реконструкции и расширению сетей, оперативному управлению распределением воды с учетом многообразия факторов (в том числе и случайных), влияющих на работу сетей, невозможно без применения расчетов с использованием компьютерных гидравлических моделей.

Еще несколько лет назад проведение таких расчетов было дорогое, требовало привлечения квалифицированных консультантов. Сейчас, благодаря развитию информационных технологий и снижению цен

---

на программное обеспечение, исследование работы сетей на их моделях стало доступным даже небольшим предприятиям и службам водоснабжения. Все больше руководителей, прежде чем принять решение, хотят видеть результаты предварительного моделирования планируемых мероприятий.

Одним из первых методов решения системы уравнений, описывающих работу сетей водоснабжения, предложил Г. Кросс в 1936 г. Работы в этом направлении проводились и в нашей стране. В частности, идеи Кросса получили развитие в методе, который описывался практически во всех отечественных учебных и справочных пособиях по расчету систем водоснабжения второй половины прошлого века под названием «метод Лобачева – Кросса». Этот метод предназначался для ручных вычислений, был весьма трудоемким, а о расчете сетей, содержащих сотни трубопроводов, не могло быть и речи.

С изобретением электронных вычислительных машин (ЭВМ), а точнее, с момента начала их серийного производства в 60-х годах прошлого века были разработаны первые программы для расчета сложных сетей водоснабжения. По сути дела, применявшиеся в них алгоритмы в то время базировались на идеях Кросса.

Конечно, широкого распространения «машинные» методы получить тогда еще не могли, поскольку самих ЭВМ было относительно мало, а работать на них могли только квалифицированные программисты.

С появлением персональных компьютеров в 80-х годах начинается бурное развитие новых информационных технологий и их проникновение практически во все сферы человеческой деятельности. Именно с того времени программы для расчета и моделирования сетей водоснабжения и водоотведения постепенно становятся рабочими инструментами инженеров соответствующих служб.

Решающее влияние на развитие возможностей программного обеспечения оказывает рост вычислительной мощности компьютеров. Первые программы использовались лишь для выполнения «увязки сети», т. е. для вычисления расходов воды в трубопроводах в тот или иной момент. Позднее с их помощью стало возможным рассчитывать изменение параметров сети во времени, исследовать

---

процесс распространения примесей (например, хлора) и изменения химического состава самой воды.

Сейчас разработаны программы для расчета нестационарных течений воды в сложных сетях – гидравлических ударов. С их помощью возможно выбирать наиболее эффективные способы борьбы с этим опасным явлением с учетом особенностей той или иной конкретной сети.

Любая математическая модель должна быть адекватна исследуемому объекту. Именно поэтому модель гидравлической сети всегда строится с учетом конкретных сведений о параметрах потоков воды в различных точках сети в различные моменты времени. Корректировка модели с использованием экспериментальных данных (так называемая калибровка) – трудоемкая процедура, требующая высокой квалификации персонала. До недавнего времени ее можно было осуществлять только путем выполнения многовариантных расчетов.

Сейчас разработаны эффективные методы калибровки, основанные на так называемых генетических (эволюционных) алгоритмах, существенно ускоряющие построение моделей сетей.

В настоящее время в состав многих программ входят модули для выполнения оптимизационных технико-экономических расчетов. С их помощью возможно выбирать наиболее выгодные с экономической точки зрения способы реконструкции существующих и прокладки новых сетей.

Для обработки данных сейчас используются программы различных типов: системы управления базами данных (СУБД) и автоматизированного проектирования (САД-системы), электронные таблицы, текстовые редакторы и многие другие. По этой причине очень важно обеспечить переносимость данных из одного приложения в другое. Современные программы для моделирования сетей водоснабжения позволяют не только импортировать данные, хранящиеся в самых разных форматах, но и вводить их простым копированием.

Особое внимание уделяется взаимодействию программ моделирования с геоинформационными системами (ГИС) и программными комплексами для мониторинга и управления технологическими процессами (SCADA).

---

Рассмотрим основные этапы построения модели сети и ее использования (см. рис.).

Первым шагом после принятия решения о начале работ по моделированию сети является выбор соответствующего программного обеспечения. Правильный выбор программного обеспечения для моделирования систем водоснабжения и водоотведения имеет очень большое значение. Конкуренция на рынке таких программ достаточно велика, поэтому все их производители обеспечивают приблизительно равные возможности своих продуктов и уровень обслуживания пользователей.

В настоящее время практически все фирмы предоставляют потенциальным покупателям возможность ознакомиться со своими продуктами. Их демонстрационные версии можно получить в региональных представительствах или через Интернет. Некоторые фирмы организуют тест-драйв своих программ. Выбирая программу, нужно убедиться, что поставщик в состоянии обеспечить быструю и квалифицированную помощь своим клиентам в процессе эксплуатации программы, поскольку у всех, особенно на первых порах, будут возникать те или иные вопросы. Конечно, необходимо убедиться, что фирма предоставляет качественные руководства по эксплуатации программ и методические пособия по решению типичных задач на русском языке.

Чаще всего программы для моделирования сетей приобретаются в последнюю очередь, т. е. когда информационная среда предприятия уже в основном сформирована. Поэтому очень важно обращать внимание на возможности экспорта и импорта данных.

Одним из основных критериев выбора программы, конечно, является ее цена. Многие программы имеют модульную структуру. Каждый модуль приобретается отдельно, поэтому стоимость программы может варьироваться в достаточно широких пределах. Состав модулей в каждом конкретном случае определяется кругом задач, которые предполагается решать в процессе моделирования.

Следует иметь в виду, что довольно часто за поддержку программы (обновление версий, сервисное обслуживание, консультации и т. п.) необходимо вносить дополнительные платежи (обычно ежегодные).

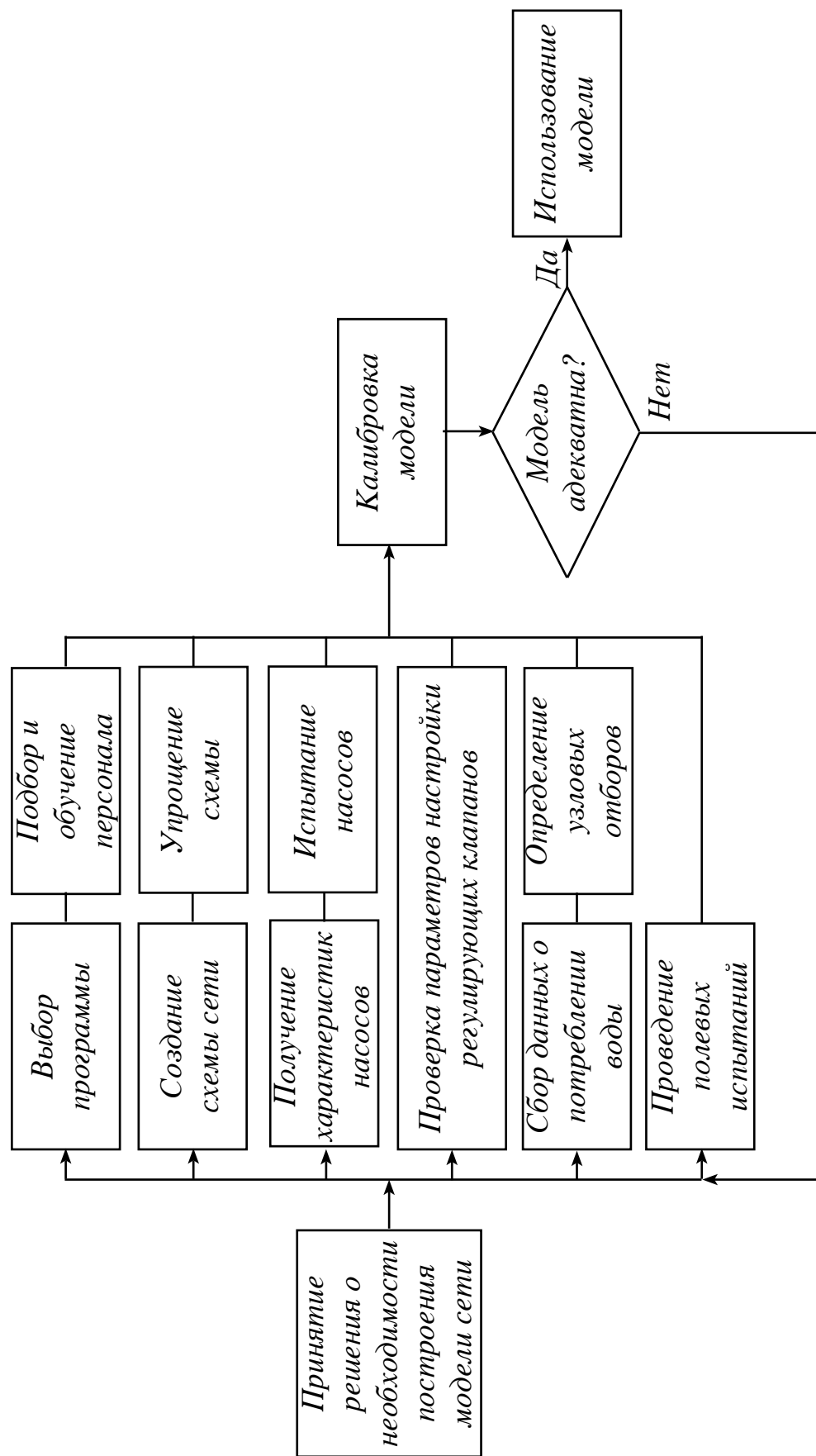


Рис. Блок-схема процесса моделирования



---

Вопрос о количестве приобретаемых лицензий решается в зависимости от конкретных условий: размеров сети, количества сотрудников предприятия, которые привлекаются для выполнения работ по моделированию, и т. п. Скорее всего, достаточно иметь две программы, но с разным набором модулей. Одна из них, предназначенная для построения модели, обязательно должна иметь полный набор функций. Другая, используемая для выполнения моделирования (расчета вариантов), может иметь сокращенный набор модулей (например, без модулей для экспорта и импорта данных, калибровки параметров модели и некоторых других).

Любая программа, даже самая современная и удобная, – это всего лишь инструмент. Ею, как всяким инструментом, нужно уметь пользоваться. Таким образом, необходимо уделять большое внимание подбору персонала и его обучению.

Обычно, если приобретается программа для моделирования сетей, работу с ней поручают одному из имеющихся в штате специалистов (который чаще всего и является инициатором ее покупки), дополнительно к его основным обязанностям.

Однако компьютерное моделирование – это серьезная аналитическая работа, которой должны заниматься специалисты с соответствующим уровнем квалификации, при этом данная работа для них должна быть основной. В штатных расписаниях подавляющего большинства предприятий «Водоканал» таких должностей пока нет.

Процесс моделирования начинают с создания расчетной схемы сети. При этом используют все возможные источники информации, имеющиеся на предприятии, проводят необходимые уточнения конфигурации сети и геометрических параметров ее элементов на месте. На этом же этапе необходимо определить параметры регулирующих и запасных емкостей.

Чаще всего включать в расчетную схему все трубопроводы и узлы нет необходимости. Поэтому схему упрощают, исключая, например, трубопроводы относительно малых диаметров, тупиковые ветви и т. п. К сожалению, допустимая степень упрощения сети в том или ином конкретном случае заранее неизвестна.

---

Предполагается, что читатели знакомы с основными понятиями гидравлики и принципами работы сетей водоснабжения в объемах соответствующих курсов для строительных специальностей вузов. Тем не менее, в первом разделе пособия рассмотрены некоторые основные законы механики жидкости и термины, необходимые для лучшего усвоения других разделов. В других разделах рассматриваются основные задачи моделирования сетей.

Пособие предназначено для самостоятельного изучения программных продуктов и содержит пошаговые инструкции для решения различных задач моделирования сетей водоснабжения.

Каждая задача выделена в самостоятельный раздел и требует для своего решения от одного до полутора часов работы за компьютером.

При подготовке пособия использованы учебные курсы Water Distribution Design and Modeling – Applying WaterCAD and WaterGEMS, Full Version V8 XM (версия 2008 г.), Bentley HAMMER V8 XM Edition User's Guide и Hydraulic Transient Analysis Modeling Featuring HAMMER и другие материалы фирмы Bentley Systems Incorporated. При этом использованы файлы соответствующих учебных проектов, а также авторские проекты, являющиеся неотъемлемой частью данного пособия.

---

# 1. Основные понятия гидравлики

## 1.1. Физические свойства жидкостей

### *Плотность*

Плотностью вещества,  $\rho$ , называют массу единицы его объема. Плотность воды в общем случае зависит от температуры, давления, вида и концентрации растворенных в ней примесей. В сетях водоснабжения перечисленные выше факторы изменяются в относительно узких пределах. Это позволяет при выполнении большинства гидравлических расчетов с достаточной точностью считать плотность воды неизменной и равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

### *Сжимаемость*

Относительное изменение объема жидкости при изменении давления характеризует коэффициент объемного сжатия,  $\beta$ . У воды при давлениях до  $50 \text{ МПа}$  он равен приблизительно  $5 \times 10^{-7} \text{ кПа}^{-1}$ , т. е. плотность очень незначительно возрастает с увеличением давления, и ее считают постоянной.

Тем не менее, от сжимаемости зависит скорость распространения в жидкости волн давления (скорость звука). При расчетах нестационарных течений (например, гидравлических ударов) этот параметр очень важен. Скорость звука в жидкости рассчитывается по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho\beta}}.$$

Для воды при указанных выше параметрах  $c = 1414 \text{ м/с}$ .

### *Вязкость*

Вязкостью называют свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу одного ее слоя относительно другого. Иными словами, при своем движении жидкость всегда расходует часть своей механической энергии на преодоление сил трения, которые возникают между потоком и стенками канала (трубы), а также и внутри самой жидкости.

---

Вязкость характеризуется двумя взаимосвязанными коэффициентами вязкости: кинематическим,  $\nu$ , и динамическим,  $\mu$ . При этом

$$\mu = \nu \rho.$$

Вязкость жидкостей уменьшается с ростом температуры. В диапазоне от 5 до 20 °С кинематический коэффициент вязкости воды уменьшается от  $1,519 \times 10^{-6}$  до  $1,004 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Зависимость вязкости от давления в тех диапазонах, которые существуют в сетях водоснабжения, очень слабая и ее не принимают во внимание.

### *Растворимость газов и парообразование*

Все жидкости обладают способностью растворять газы. Количество растворенного газа, обычно воздуха, увеличивается с ростом давления и температуры.

Снижение давления и температуры приводит к выделению газов в виде пузырьков. Таким образом, образуется механическая смесь газа и жидкости, которая отрицательно влияет на работу оборудования, нарушается стабильность течения жидкости в трубопроводах. Кислород, присутствующий в воздушных пузырьках, вызывает коррозию металлических поверхностей трубопроводов и другого оборудования.

Другой причиной появления в воде газовой фазы является парообразование. Испаряемость жидкости характеризует давление насыщенного пара,  $p_{н.п}$ , т. е. давление, при котором она закипает при данной температуре (табл. 1.1).

Процесс вскипания жидкости при понижении давления в потоке жидкости называют кавитацией. Кавитация очень часто возникает при гидравлических ударах.

Таблица 1.1

Зависимость давления насыщенного пара воды от температуры

Температура, °С	Давление $p_{н.п}$ , кПа
0	0,61
20	2,33
40	7,45
100	101,3

## 1.2. Давление

Одним из основных понятий гидравлики является давление жидкости. Давлением,  $p$ , называют силу, действующую со стороны жидкости на единицу площади плоской поверхности и расположенную перпендикулярно направлению действия силы.

Основной единицей измерения давления является паскаль – Па ( $\text{Н/м}^2$ ). Тем не менее, в технике используются и другие единицы. Соотношения между некоторыми из них показаны в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Соотношения между единицами измерения давления

$p_A \backslash p_B$	Па	кПа	МПа	бар	кгс/см <sup>2</sup> (атм)
Па	1	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10,2 \cdot 10^{-6}$
кПа	$10^3$	1	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10,2 \cdot 10^{-3}$
МПа	$10^6$	$10^3$	1	10	10,2
бар	$10^5$	$10^2$	0,1	1	1,02
кгс/см <sup>2</sup>	98000	98	0,098	0,98	1

*Примечание.* Пример использования таблицы

Общая формула:  $p_B = K \times p_A$ , где  $p_A$  – «старая» единица измерения,  $p_B$  – «новая» единица измерения.

Пусть требуется перевести  $p_A = 20$  МПа в бары. По таблице определяем, что  $K = 10$ . Таким образом,  $p = 10 \times 20 \text{ МПа} = 200 \text{ бар}$ .

В зависимости от того, какое значение принято за начало шкалы отсчета давлений ( $p = 0$ ), различают абсолютное,  $p^{\text{абс}}$ , и избыточное,  $p^{\text{изб}}$ , (манометрическое) давление (рис. 1.1).

Для шкалы абсолютного давления за нулевое значение принят так называемый абсолютный вакуум. Таким образом, оно может быть только положительным.

За нуль шкалы избыточного давления принято атмосферное давление,  $p_{\text{атм}}$ , т. е. избыточное давление – это превышение давления в какой-либо точке над атмосферным:

$$p^{\text{изб}} = p^{\text{абс}} - p_{\text{атм}}.$$

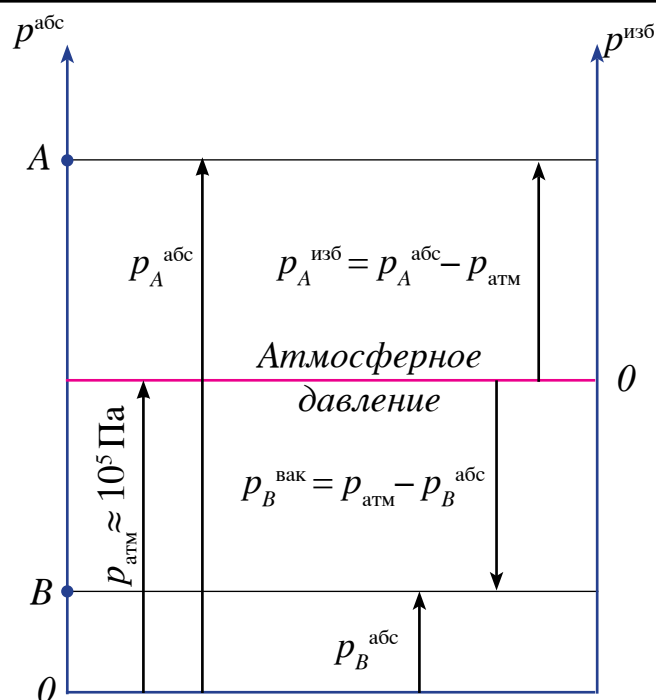


Рис. 1.1. Соотношение между абсолютным и избыточным давлением

Избыточное давление может принимать отрицательные значения. В этом случае его называют вакуумом:

$$p^{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p^{\text{абс}}.$$

В сетях водоснабжения возникновение вакуума не допускается, поскольку это может привести к разрушению трубопроводов.

Строго говоря, атмосферное давление не является постоянным. Однако это не имеет значения, поскольку при расчетах обычно используют избыточные давления. Далее во всех формулах будет использоваться именно такое давление.

Можно доказать, что во всех точках произвольной горизонтальной плоскости, проведенной внутри объема неподвижной жидкости, давление одинаковое.

Связь между давлениями в произвольных точках неподвижного объема жидкости определяется с помощью основного закона гидростатики (рис. 1.2):

$$p_B = p_A + \rho g(z_A - z_B) = p_A + \rho gh,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Простейшим прибором для измерения избыточного давления является пьезометр – вертикальная прозрачная трубка. Под дей-

ствием избыточного давления  $p$  жидкость поднимается в ней на некоторую высоту  $h$ , которую легко измерить (рис. 1.3).

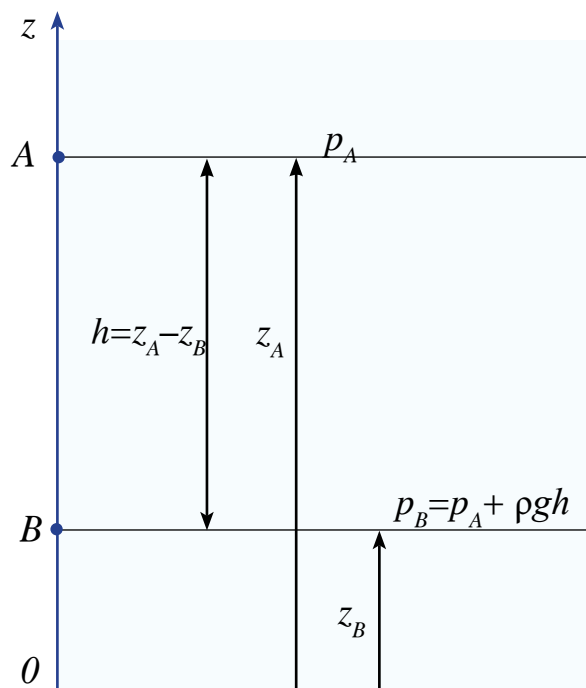


Рис. 1.2. Основной закон гидростатики

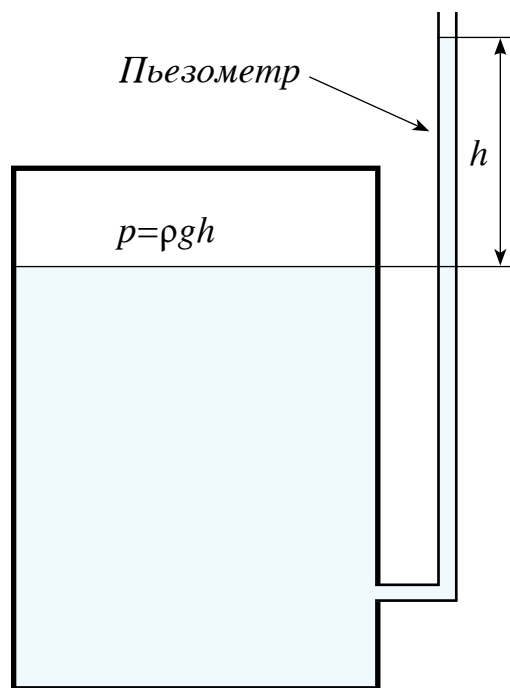


Рис. 1.3. Измерение избыточного давления с помощью пьезометра

Поскольку на практике для измерения давлений используют манометры, то в их показания,  $p_m$ , необходимо вводить поправку на высоту их установки (рис. 1.4).

Высоту  $h$  называют пьезометрической. У основного закона гидростатики есть важное следствие – возможность измерения давления в единицах длины (высоты столба данной жидкости).

В частности, давлению 1 Па соответствует высота столба воды 0,102 мм (при  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ). Если жидкость – ртуть, то  $h = 7,5 \times 10^{-3} \text{ мм}$  (при  $\rho = 13600 \text{ кг/м}^3$ ).

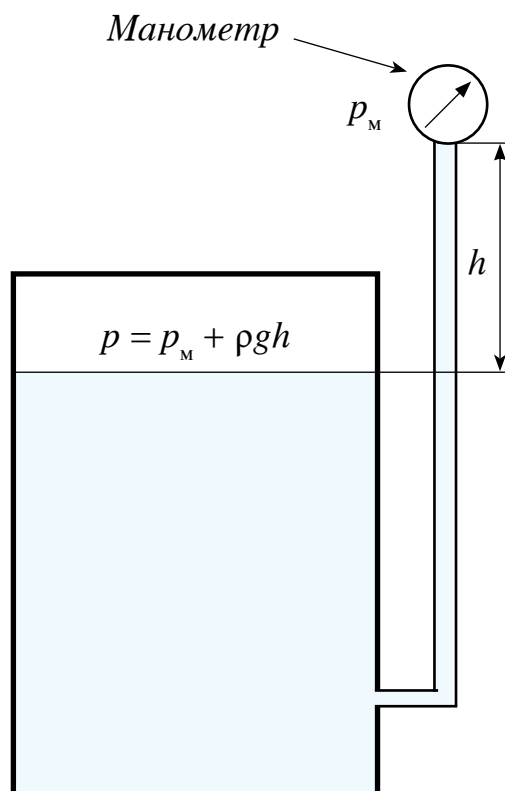


Рис. 1.4. Корректировка показаний манометра

---

В практике расчетов и эксплуатации сетей водоснабжения избыточное давление обычно измеряют в метрах водяного столба (м вод. ст.) и называют его свободным напором. При этом

$$1 \text{ кг/см}^2 = 0,98 \text{ бар} = 10 \text{ м вод. ст.}$$

Значения давлений в трубопроводах реальных сетей зависят от рельефа местности, этажности застройки и регламентируются СНиП 2.04.02-84\*. Минимальный свободный напор в сети водопровода населенного пункта при максимальном хозяйственно-питьевом водопотреблении на вводе в здание над поверхностью земли должен составлять при одноэтажной застройке не менее 10 м вод. ст., при большей этажности на каждый этаж добавляют по 4 м вод. ст.

Таким образом, напор воды в сети водоснабжения обычно составляет несколько десятков метров. Наиболее типичные значения 30–60 м вод. ст. При напорах более 60 м вод. ст. сильно возрастает вероятность разрушения трубопроводов.

### 1.3. Расход

Расходом называют количество жидкости, протекающей через какое-либо сечение потока за единицу времени.

Расход может быть массовым,  $G$ , или объемным,  $Q$ . При этом

$$G = \rho Q.$$

При расчетах и эксплуатации сетей водоснабжения обычно используют объемные расходы. При этом рассматривают: расходы воды в трубах, узловые отборы, подачу (производительность) насосов (насосных станций), подачу воды в напорные резервуары. Соотношения между различными единицами измерения расхода показаны в табл. 1.3.

С помощью расхода определяется средняя скорость движения жидкости в трубопроводе

$$V = \frac{Q}{S},$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения трубы, перпендикулярного вектору скорости.

Рекомендуемые СНиП значения скоростей для вновь проектируемых трубопроводов зависят от их диаметров и лежат в диапазоне от 0,6 до 2 м/с.



Таблица 1.3

Соотношения между единицами измерения объемного расхода

$Q_A \backslash Q_B$	л/с	м <sup>3</sup> /с	м <sup>3</sup> /час	галлон/мин
л/с	1	0,001	3,6	15,85
м <sup>3</sup> /с	1000	1	3600	15850
м <sup>3</sup> /час	0,278	$0,278 \cdot 10^{-3}$	1	4,403
галлон/мин	0,0631	$6,31 \cdot 10^{-5}$	0,2271	1

*Примечание.* Правила использования таблицы см. в примечании к табл. 1.2.

В существующих сетях значения скоростей, конечно, могут выходить за указанные границы. Они могут быть очень низкими, но лишь в редких случаях превышают 2 м/с.

Одним из основных физических законов, использующихся при гидравлических расчетах, является закон сохранения расхода.

При течении жидкости в трубах (каналах) с переменным по их длине сечением  $S$  данный закон проявляется в изменении скорости  $V$  в соответствии с соотношением (рис. 1.5):

$$V_1 S_1 = V_2 S_2.$$

При слиянии (разделении) потоков в узловых точках сети сумма расходов воды, втекающей в узел, должна равняться сумме расходов истекающей жидкости с учетом узловых отборов,  $q$ . Например, для схемы, показанной на рис. 1.6,

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + q.$$

Если жидкость с расходом  $Q$  поступает в резервуар с площадью поперечного сечения  $S$  (рис. 1.7), то изменение ее

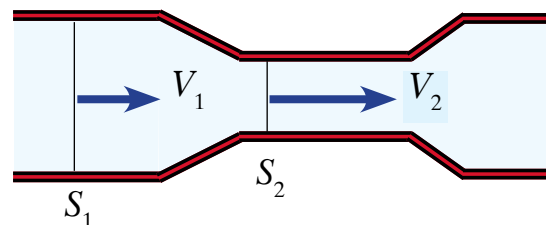


Рис. 1.5. Изменение средней скорости в трубе переменного сечения

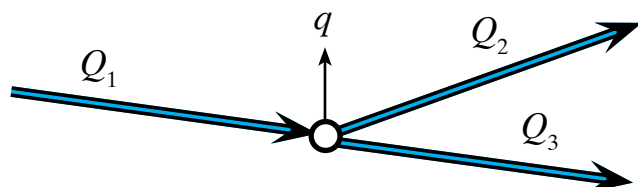
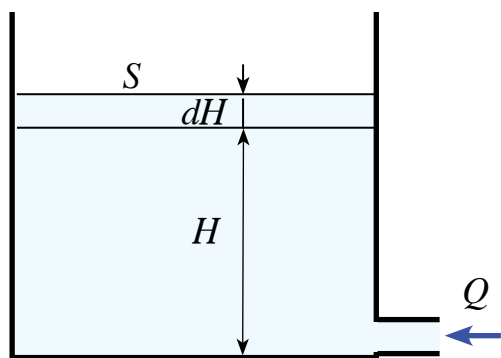


Рис. 1.6. Баланс расходов при разделении потока жидкости



уровня  $H$  определяется соотношением:

$$Q = S \frac{dH}{dt}.$$

Рис. 1.7. Изменение уровня жидкости в резервуаре

### 1.3. Баланс механической энергии при движении жидкости

Математическим выражением закона сохранения и превращения механической энергии жидкости является уравнение Бернулли. Его обычно записывают так, что все слагаемые имеют размерность длины. Их называют напорами. Для двух любых сечений потока жидкости

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \Delta h_w,$$

где  $z_1, z_2$  – вертикальные координаты центров сечений, перпендикулярных векторам скорости потока  $V_1, V_2$ ,  $\Delta h_w$  – потери напора жидкости между рассматриваемыми сечениями.

Механическая энергия движущейся жидкости, как и твердого тела, представляет собой сумму кинетической и потенциальной энергии.

Кинетическую энергию характеризует скоростной (динамический) напор  $V^2/(2g)$ .

Потенциальная энергия жидкости характеризуется пьезометрическим напором  $z + p/(\rho g)$ .

Слагаемое  $z$  называют геометрическим напором. Он характеризует ту часть потенциальной энергии, которая обусловлена действием на жидкость силы тяжести.

---

Абсолютное значение координаты  $z$  не существенно. Важно лишь ее изменение по ходу течения жидкости. Именно поэтому отсчет высоты сечений можно осуществлять от произвольной (но общей для всех сечений) горизонтальной плоскости – плоскости сравнения. В нашей стране при расчетах сетей водоснабжения отсчет вертикальных координат осуществляют от уровня Балтийского моря (Балтийская система высот).

Величину  $p/(\rho g)$  называют свободным напором. Он характеризует потенциальную энергию сил давления.

Сумма скоростного и пьезометрического напора называется полным напором жидкости. По ходу течения полный напор уменьшается вследствие того, что жидкость тратит часть своей энергии на преодоление гидравлических сопротивлений  $\Delta h_w$ .

Увеличение полного напора жидкости возможно только за счет внешних источников энергии, например насосных агрегатов.

При расчетах трубопроводов сетей водоснабжения полный напор обычно считают равным пьезометрическому, поскольку величина скоростного напора мала по сравнению с другими слагаемыми уравнения Бернулли.

Потери напора  $\Delta h_w$  в общем случае представляют собой сумму линейных,  $\Delta h_l$ , и местных,  $\Delta h_m$ , потерь:

$$\Delta h_w = \Delta h_l + \Delta h_m.$$

Линейные потери обусловлены действием сил трения. Местные потери возникают в тех участках потока, где происходят резкие изменения скорости жидкости по величине или направлению, т. е. связаны с изменением геометрических параметров потока.

На рис. 1.8 показано изменение полного и пьезометрического напора в трубе переменного сечения. Плоскость сравнения не показана, поскольку труба горизонтальная. Как видно, рост скорости приводит к понижению пьезометрического напора, а ее уменьшение – к увеличению. Полный напор на выходе из трубы меньше, чем на входе, из-за наличия потерь механической энергии. Общие потери энергии в данном случае выражаются в уменьшении давления (свободного напора).

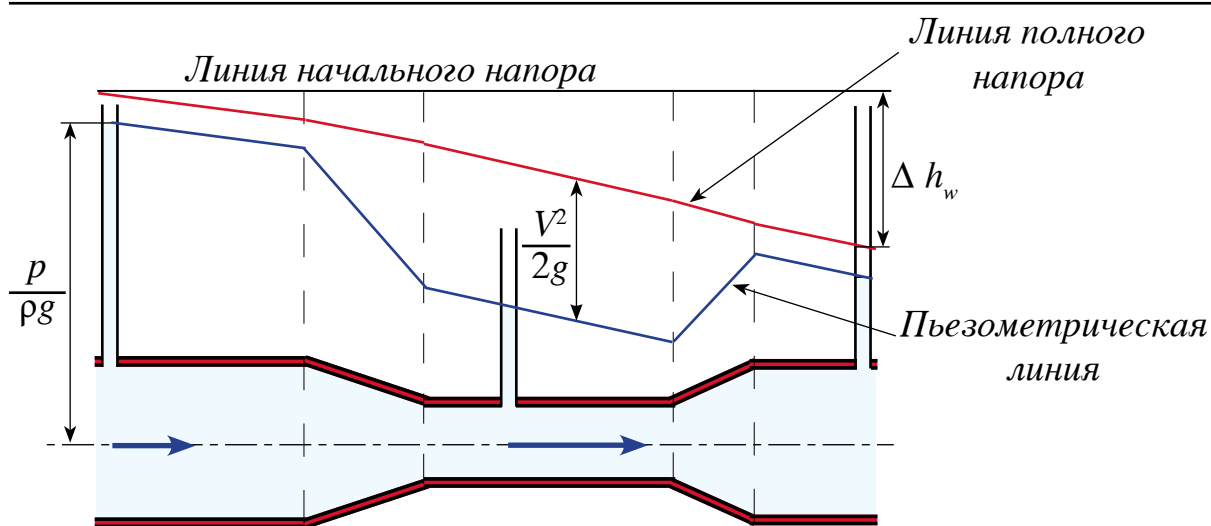


Рис. 1.8. Иллюстрация уравнения Бернулли

На рис. 1.9 показано изменение напора по длине горизонтальной и наклонной трубы. Изображена только пьезометрическая линия, поскольку скоростной напор считается малым. При прочих равных условиях увеличение угла наклона трубы приводит к уменьшению свободного напора.

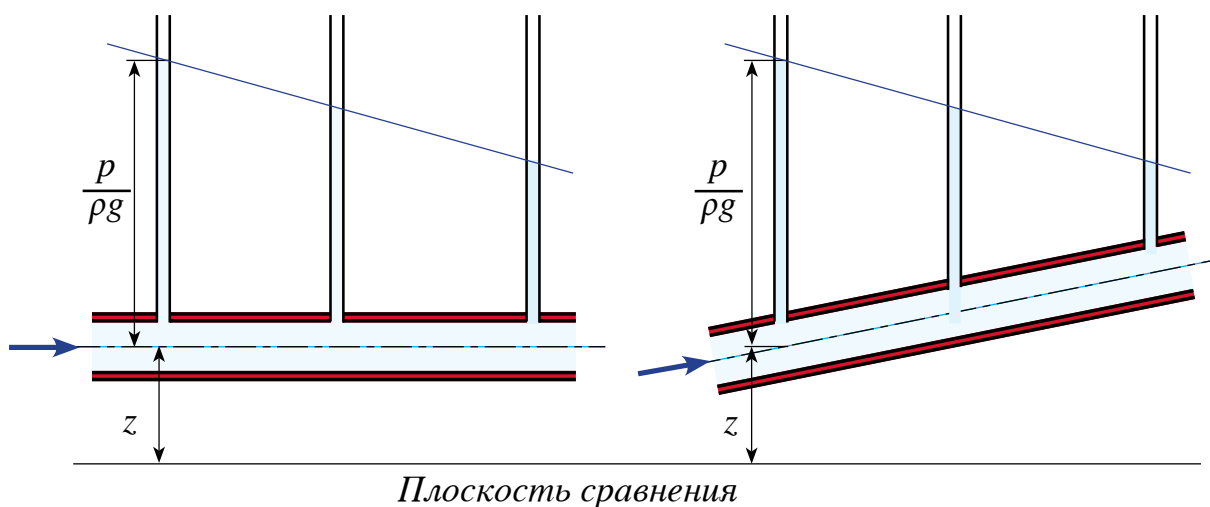


Рис 1.9. Падение напора, обусловленное действием сил трения, в горизонтальном и наклонном трубопроводе

На рис. 1.10 показан сифонный трубопровод. В точках пересечения его оси с пьезометрической линией (А, В) свободный напор равен нулю. Во всех сечениях трубы, расположенных выше пьезометрической линии, внутри нее вакуум. Его максимальная величина достигается в точке С.

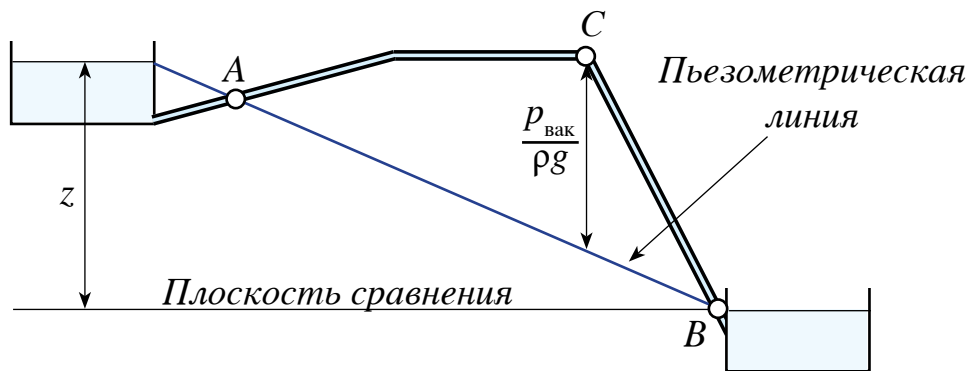


Рис 1.10. Сифонный трубопровод

Течение в трубе с промежуточным отбором,  $q$ , части расхода воды иллюстрирует рис. 1.11. На нем пьезометрическая линия 1 соответствует случаю  $q = 0$ , т. е. по всей длине расход одинаковый.

Если в т.  $C$  часть жидкости по той или иной причине отбирается с расходом  $q$ , напор в точке отбора уменьшается. Расход в трубе  $AC$  возрастает, а в трубе  $CB$  уменьшается (линия 2).

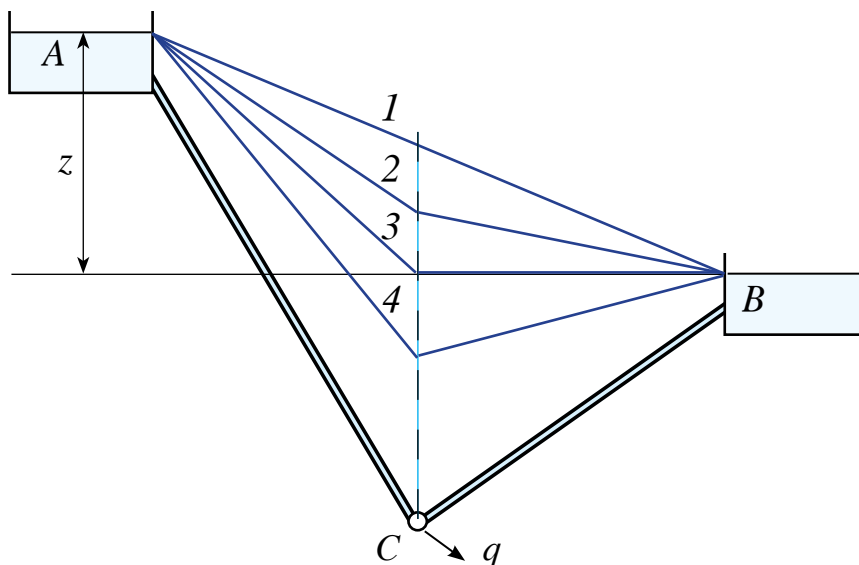


Рис 1.11. Трубопровод с узловым отбором

Дальнейшее увеличение отбора приводит к тому, что при каком-то его значении в т.  $C$  напор становится равным напору в резервуаре  $B$ . В этот момент течение воды в трубе  $CB$  прекратится (линия 3).

Еще большее увеличение отбора приведет к дальнейшему уменьшению напора в т.  $C$ , и резервуар  $B$  превратится в источник (линия 4).

---

## 1.4. Потери напора по длине трубопровода

В мировой практике для расчета потерь напора по длине трубопроводов используются несколько методик. Все они учитывают, что потери напора зависят от физических свойств жидкости, скорости ее течения и состояния поверхности (шероховатости) трубы. Результаты вычислений по этим методикам близки, поскольку они основаны на экспериментальных данных.

Программы для расчета сетей обычно позволяют выбрать одну из трех методик расчета линейных потерь напора.

Наиболее универсальной является формула Дарси – Вейсбаха (Darcy – Weisbach):

$$\Delta h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g},$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения,  $l$  – длина трубы,  $d$  – ее внутренний диаметр.

Коэффициент трения определяется программами автоматически на основе заданных пользователем свойств трубы (материала, диаметра), физических свойств жидкости и скорости ее движения. Обычно его значения лежат в диапазоне 0,02–0,03.

Потери напора в потоках воды можно рассчитывать по формуле Хазена – Вильямса (Hazen – Williams):

$$\Delta h_l = 6,79 l \left( \frac{V}{C} \right)^{1,85} \frac{1}{d^{1,16}},$$

В ней имеется один экспериментальный коэффициент, так называемый  $C$ -фактор, зависящий от материала трубы и времени ее эксплуатации. Его значения при использовании системы СИ чаще всего равны 100–150.

Еще одной моделью для определения потерь напора по длине потоков воды является формула Маннинга (Manning):

$$\Delta h_l = \frac{10,29 l (nQ)^2}{d^{5,33}},$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости поверхности трубы (коэффициент Маннинга). Его значения при использовании системы СИ

---

обычно составляют 0,01–0,02 и определяются программами автоматически.

## 1.5. Потери напора в местных сопротивлениях

Местные потери напора – это потери, обусловленные местными гидравлическими сопротивлениями, то есть такими элементами трубопроводов, в которых вследствие изменения поперечных размеров или конфигурации происходит деформация потока.

Основные виды местных потерь напора можно условно подразделить на ряд групп, соответствующих определенным видам местных сопротивлений:

- потери, связанные с изменением поперечного сечения потока (внезапное или плавное расширение и сужение);
- потери, вызванные изменением направления потока (колена, угольники, отводы, фитинги);
- потери, связанные с протеканием жидкости через арматуру различного типа (краны, вентили, задвижки, заслонки, приемные и обратные клапаны, сетки, фильтры);
- потери, связанные с разделением и слиянием потоков (тройники, крестовины).

Расчет величины потерь напора выполняют по формуле:

$$\Delta h_l = \xi \frac{V^2}{2g},$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления зависит в основном от формы местного сопротивления и его геометрических размеров. Для различных видов местных сопротивлений его находят экспериментально (за редкими исключениями) и представляют в виде эмпирических формул, графиков или в табличной форме. Программы для расчета сетей обычно имеют в своем составе библиотеку этих коэффициентов для большого числа различных местных сопротивлений.

Очень часто в качестве характеристики местного сопротивления используют не коэффициент  $\xi$ , а эквивалентную длину  $l_{\text{э}}$ .

---

Эквивалентной длиной местного сопротивления называют длину трубопровода, в котором потери напора  $\Delta h_l$  равняются потерям напора  $\Delta h_m$  в данном местном сопротивлении.

Методика вычисления эквивалентной длины определяется принятой моделью расчета линейных потерь напора. Например, при использовании формулы Дарси – Вейсбаха:

$$l_{\text{э}} = d \frac{\xi}{\lambda} ,$$

Сумма физической длины трубопровода и эквивалентных длин имеющихся на нем местных сопротивлений называется его приведенной длиной,  $L$ . После такой замены при дальнейших расчетах местные сопротивления уже не учитываются.

## 1.6. Система уравнений гидравлической сети

С точки зрения математики схема сети представляет собой граф, т. е. структуру, состоящую из некоторого количества точек (узлов) и соединяющих их отрезков (дуг, ребер).

Применительно к гидравлическим сетям элементы графа имеют вполне конкретный смысл: узлы – точки размещения питателей, потребителей, колодцы и т. п., ребра – трубопроводы. В некоторых случаях приходится вводить дополнительные узлы – точки, где установлены измерительные приборы, изменяется диаметр трубопровода и т. п.

Поскольку в сетях водоснабжения жидкость движется в определенном направлении, то путь обхода узлов в данный момент времени оказывается строго регламентированным. Таким образом, граф является ориентированным.

Принцип обозначения узлов и расходов иллюстрирует рис. 1.12. Все узлы нумеруются (именуются) произвольным образом. Тогда трубопровод, соединяющий узлы  $i$  и  $j$ , обозначается  $Q_{ij}$ . Узловой отбор в узле  $i$  обозначается  $q_i$ .

При выполнении любых гидравлических расчетов имеют дело с уравнениями двух типов: уравнениями баланса (сохранения) расходов жидкости в узлах сети и баланса механической энергии на ее участках (ребрах).



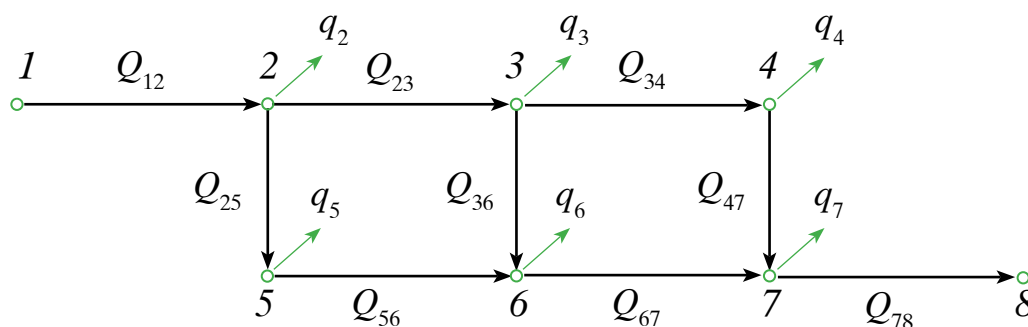


Рис. 1.12. Принцип обозначения элементов графа гидравлической сети

Применительно к гидравлической сети это означает, что сумма расходов жидкости, втекающей в какой-либо узел, равняется сумме расходов истекающей жидкости. Например, для узла № 3 на рис. 1.12:

$$Q_{23} = Q_{36} + Q_{34} + q_3 .$$

Условия баланса механической энергии записываются для каждого трубопровода. Согласно уравнению Бернулли для трубопровода, в котором жидкость движется от узла  $i$  к узлу  $j$ , без учета скоростных напоров

$$\frac{p_i}{\rho g} + z_i = \frac{p_j}{\rho g} + z_j + \Delta h_{w, ij} ,$$

Если обозначить гидростатический напор в узле

$$H = \frac{p}{\rho g} + z$$

и выразить потери напора через расход, то для каждого трубопровода

$$H_i - H_j = B_{ij} Q_{ij}^2 ,$$

где  $B_{ij}$  – его сопротивление.

Сопротивление определяется в соответствии с принятой методикой расчета линейных потерь напора. При использовании формулы Дарси – Вейсбаха (в системе СИ):

$$B_{ij} = 0,0827 \lambda_{ij} \frac{L_{ij}}{d_{ij}^5} .$$

При расчетах по формуле Хазена – Вильямса:

$$B_{ij} = \frac{10,7 L_{ij}}{C_{ij}^{1,88} d_{ij}^{4,87}}.$$

При использовании метода Маннинга:

$$B_{ij} = \frac{10,3 L_{ij} n_{ij}^2}{d_{ij}^{5,33}}.$$

Поскольку потери напора – положительная величина, то предполагается, что  $H_i > H_j$ . С другой стороны, до начала расчета направление движения жидкости точно известно далеко не во всех трубах. Решить эту проблему можно, если считать расходы величинами, имеющими знак, т. е. положительными или отрицательными. Тогда:

$$H_i - H_j = B_{ij} Q_{ij}^2 \frac{Q_{ij}}{|Q_{ij}|}.$$

Первоначально направления движения воды во всех трубах указываются условно и все расходы считаются положительными. Если в результате расчета оказывается, что некоторые расходы отрицательные, то это означает, что действительное направление движения жидкости противоположно принятому до начала вычислений.

Зависимость напора  $H$  на входе в сеть (например, в узле 1 на рис. 1.12) от подаваемого в нее расхода  $Q$  ( $Q_{12}$  на том же рисунке) называется характеристикой сети (рис. 1.13). Напор, соответствующий  $Q = 0$ , называется статическим,  $H_{ст}$ .

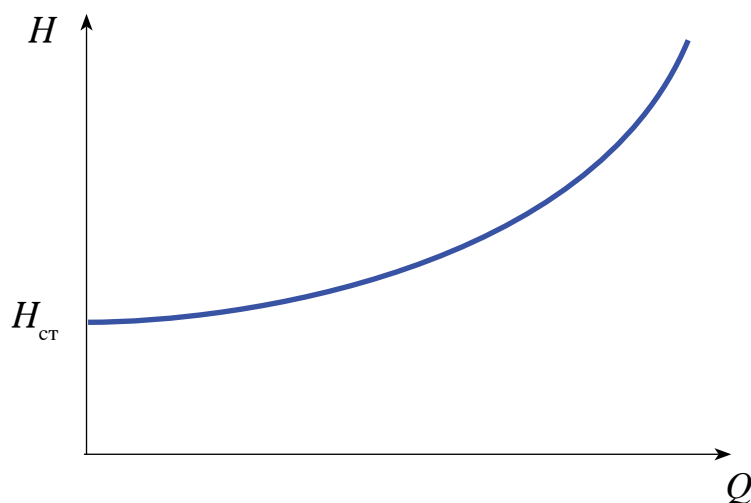


Рис. 1.13. Характеристика трубопровода (сети)

---

Общее количество уравнений, описывающих работу сети, может достигать нескольких сотен и даже тысяч. Относительно расходов система уравнений сети является нелинейной, что и создает основные сложности при ее решении. Современные методы решения таких систем и их компьютерные реализации описаны в специальной литературе.

## **1.7. Нестационарное движение жидкости**

Рассмотренные выше уравнения гидравлической сети описывают только стационарные (установившиеся) или квазистационарные (медленно изменяющиеся во времени) процессы. Нестационарные (быстропротекающие) гидродинамические процессы описываются иными математическими зависимостями, которые будут рассмотрены ниже. Здесь же заметим, что решение с их помощью практически важных задач стало возможным лишь благодаря развитию компьютерных технологий в последней четверти XX века.

Применительно к сетям водоснабжения наиболее важной задачей такого класса является анализ распространения волн давления при гидравлических ударах.

Гидравлическим ударом называют комплекс явлений, возникающих в жидкости при резком изменении скорости ее движения, благодаря чему возникает колебательный затухающий процесс, сопровождающийся резким повышением и понижением давления.

Гидравлические удары часто являются причиной серьезных аварий систем водоснабжения. Гидроудары могут возникать:

- при внезапном выключении насосов вследствие нарушения электропитания;
- выключении одного из совместно работающих насосов до закрытия задвижки на его напорной линии;
- пуске насоса при открытой задвижке на напорной линии;
- быстром (механизированном) отключении водоводов;
- открытии или закрытии быстродействующей водоразборной арматуры и т. п.

Классическими исследованиями Н. Е. Жуковского и Л. Аллиеви было установлено, что при внезапном уменьшении скорости движе-

ния жидкости на величину  $\Delta V$  увеличение давления в трубопроводе  $\Delta p_{\text{уд}}$  составляет:

$$\Delta p_{\text{уд}} = \rho c \Delta V,$$

где  $c$  – скорость распространения волны давления (скорость звука) в трубопроводе.

Если принять во внимание, что в воде скорость звука весьма велика (около 1000 м/с), то увеличение напора при изменении скорости на 1 м/с составит около 10 бар!

На рис. 1.14 показан схематичный график изменения давления у задвижки при ее внезапном перекрытии. Сплошная линия соответствует идеальному удару без потерь механической энергии. Пунктир – изменение давления в реальной жидкости.

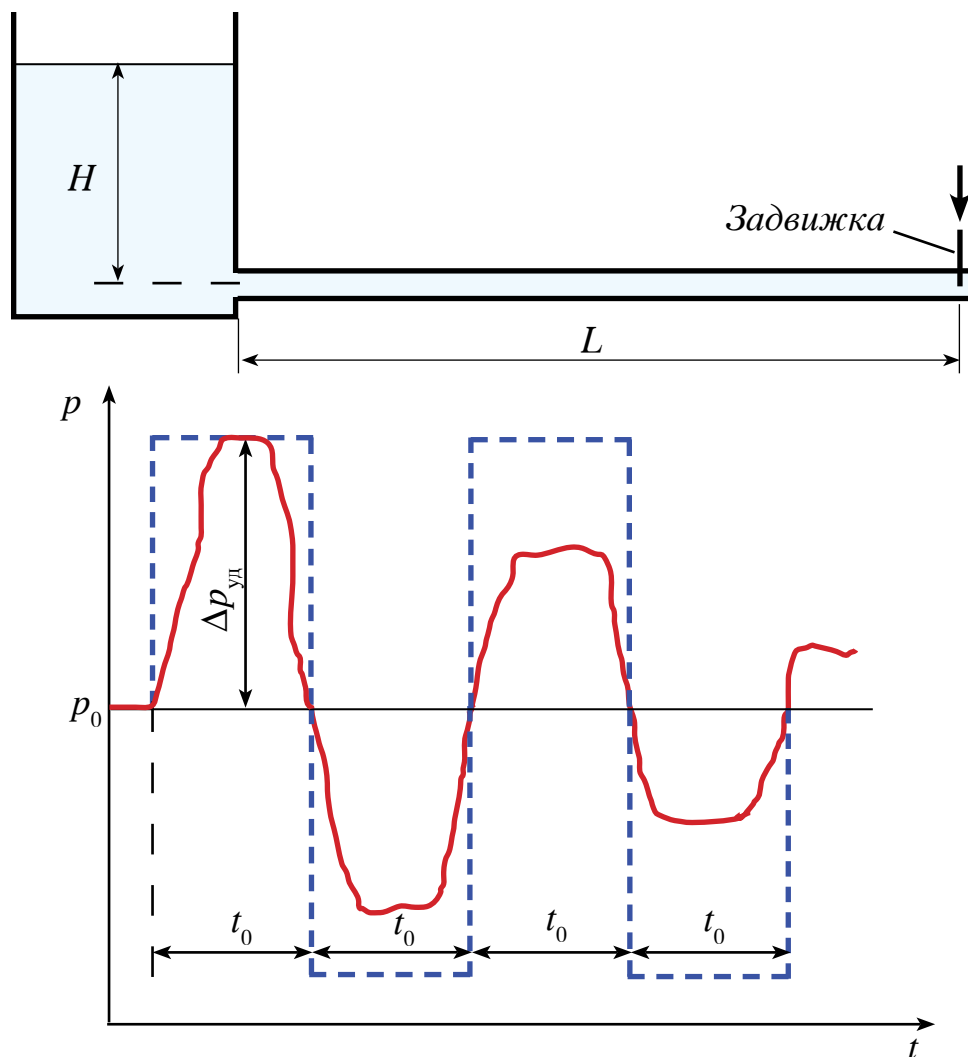


Рис. 1.14. Характер изменения давления у задвижки при ее внезапном перекрытии

---

Амплитуда колебания давления постепенно уменьшается из-за действия силы трения (диссипации энергии). Колебания происходят около давления  $p_o = \rho g H$ .

К началу шестидесятых годов прошлого столетия основные физические и гидродинамические процессы, протекающие в элементах трубопроводных систем при гидравлическом ударе, были в основном изучены. В частности, было установлено, что в реальных (сложных) гидросистемах специфика переходных процессов во многом определяется многократным наложением волн давления, отражающихся от различных конструктивных элементов системы, и трансформацией этих волн при их прохождении по длине трубопроводов.

При математическом описании таких процессов используют фундаментальные законы гидромеханики:

– уравнение неразрывности потока:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0;$$

– уравнение Навье – Стокса:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \lambda \frac{V|V|}{2d} = 0.$$

Скорость распространения волны давления  $c$  рассчитывают с учетом упругих свойств материала трубопровода:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1}{E_0} + \frac{d}{\delta E}}},$$

где  $E_0$  – объемный модуль упругости воды,  $E$  – модуль упругости материала стенок трубопровода,  $d$  – его внутренний диаметр,  $\delta$  – толщина стенок.

Решение приведенных дифференциальных уравнений осуществляется численными методами с использованием компьютеров. Их внедрение и массовое использование позволило проводить расчеты гидравлических ударов практически без ограничения сложности сетей, в том числе и с учетом кавитационных явлений.

## 2. Построение схемы сети и ее гидравлический расчет

### 2.1. Запуск программы WaterGEMS и начальные настройки

Запуск программы WaterGEMS осуществляется с помощью соответствующего пункта меню **Пуск** операционной системы или иконки  на рабочем столе компьютера.

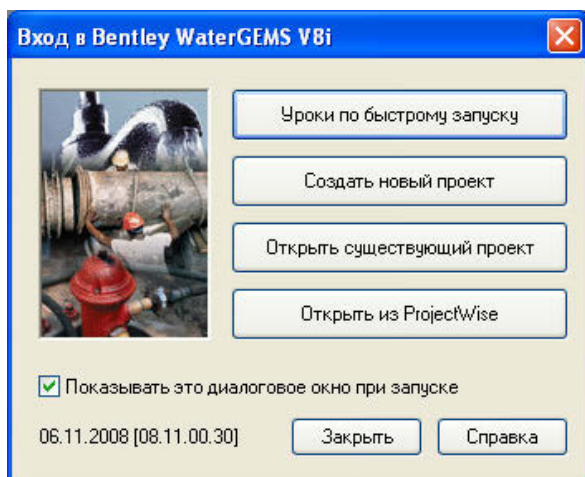



Рис. 2.1. Окно начального диалога WaterGEMS

При первом запуске на экран выводится окно начального диалога, с помощью которого можно выбрать то или иное действие (рис. 2.1).

В нашем случае следует создать новый проект. Через некоторое время на экране появится пустое окно проекта с заголовком *Без имени1.wtg* (рис. 2.2).

В дальнейшем для создания новых проектов вы можете использовать пункт главного меню программы **Файл – Создать** или кнопку  панели инструментов.

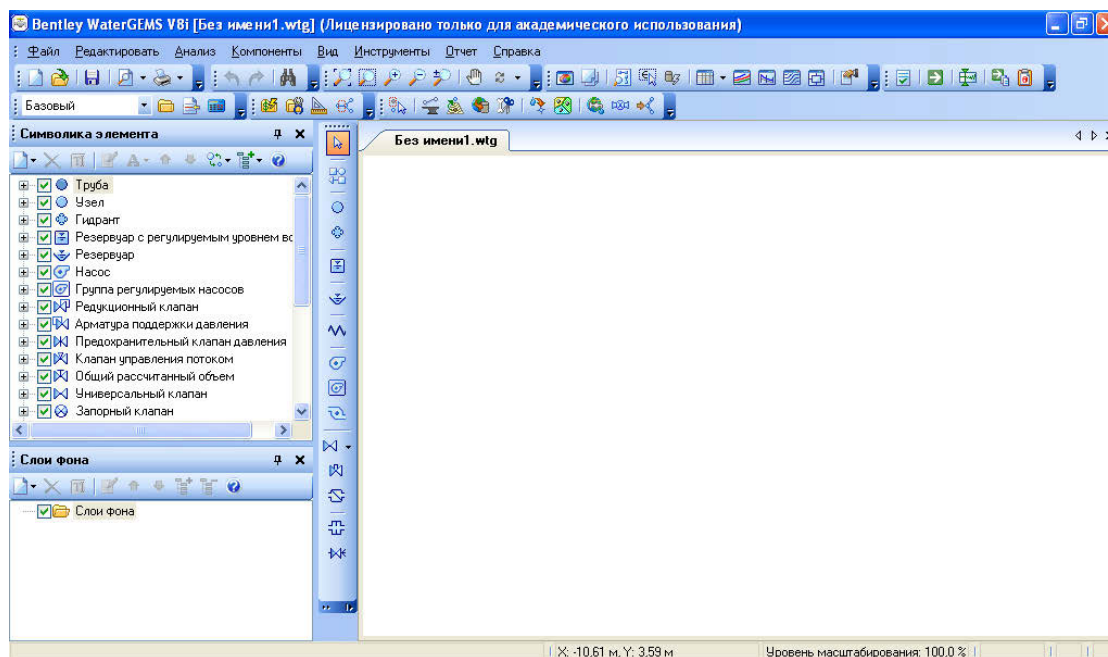


Рис. 2.2. Рабочее окно WaterGEMS

Желательно сразу сохранить файл проекта с помощью пункта главного меню **Файл – Сохранить**. Поскольку проекты WaterGEMS включают несколько файлов различного назначения, каждый проект целесообразно хранить в отдельной папке.

Далее следует задать систему единиц. Для этого выберите пункт главного меню **Инструменты – Опции... – Единицы**. Укажите, что по умолчанию будет использоваться система единиц СИ (рис. 2.3).

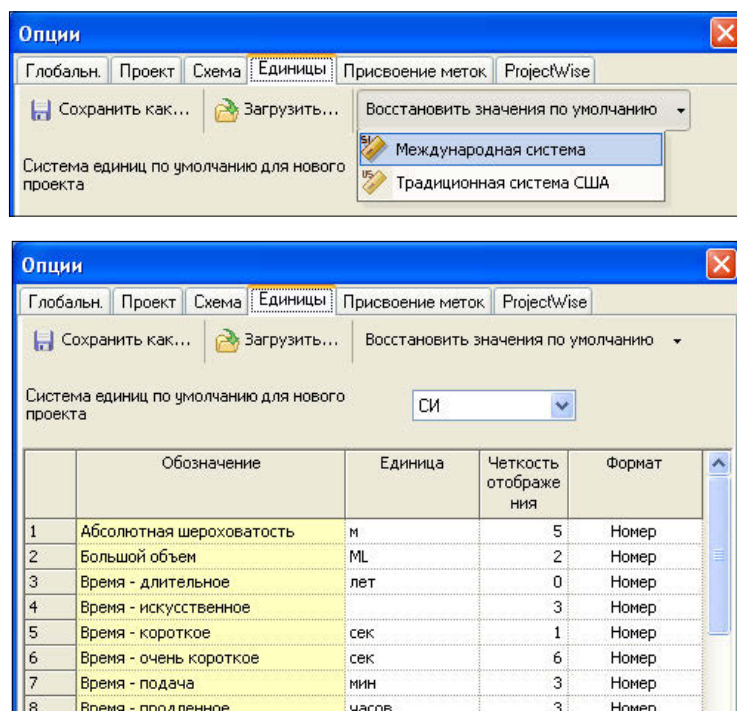


Рис. 2.3. Выбор системы единиц

Откройте вкладку *Схема* окна *Опции* и установите масштабированный режим черчения. Задайте коэффициент масштаба печати 1 см = 40 м (рис. 2.4).

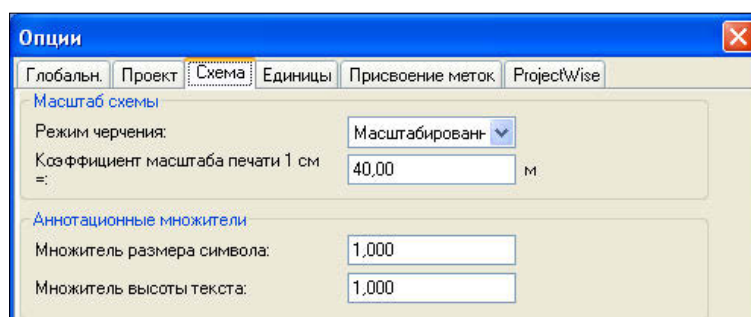


Рис. 2.4. Задание масштаба

---

При желании укажите общие сведения о проекте с помощью пункта главного меню **Файл – Свойства проекта** (рис. 2.5). Сохраните проект.

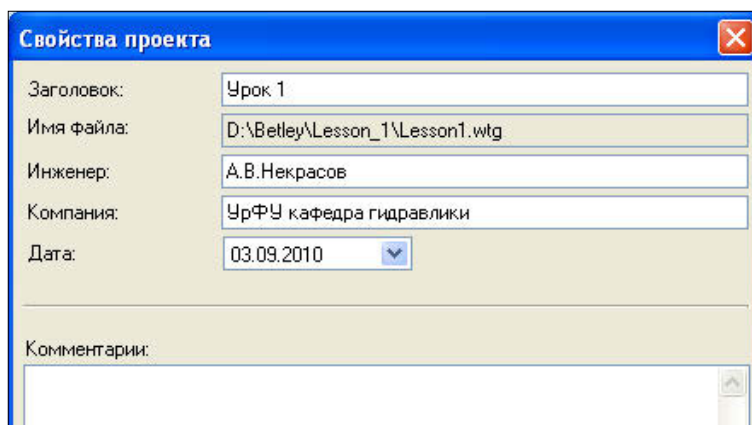


Рис. 2.5. Свойства проекта

## 2.2. Установка фонового слоя

Фоновые слои используются для привязки схемы сети к плану местности, строительным объектам, дорогам и т. п. Вы можете добавлять или удалять фоновые слои, переименовывать их.

В качестве фоновых слоев могут использоваться векторные файлы MicroStation, шэйп-файлы ArcGIS, *dxf*-файлы AutoCAD, а также растровые рисунки различных форматов: *bmp*, *jpg*, *jpeg*, *jpe*, *jfif*, *gif*, *tif*, *tiff*, *png*, *sid*.

В данном случае в качестве фонового слоя используется заранее созданный с помощью AutoCAD план местности *Lesson1.dxf* (предоставлен фирмой Bentley). Чтобы установить этот слой, выполните следующие действия.

В окне *Слои фона* с помощью правой кнопки мыши откройте контекстное меню и выберите пункт **Слои фона – Создать – Файл** (рис. 2.6). С помощью Проводника операционной системы найдите и откройте файл *Lesson1.dxf*.

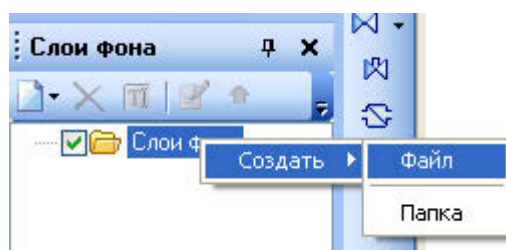


Рис. 2.6. Создание фонового слоя из файла



В окне *DXF свойства* в качестве единиц измерения координат точек фонового слоя укажите метры (рис. 2.7). При желании можете задать прозрачность этого слоя (50–60 %).

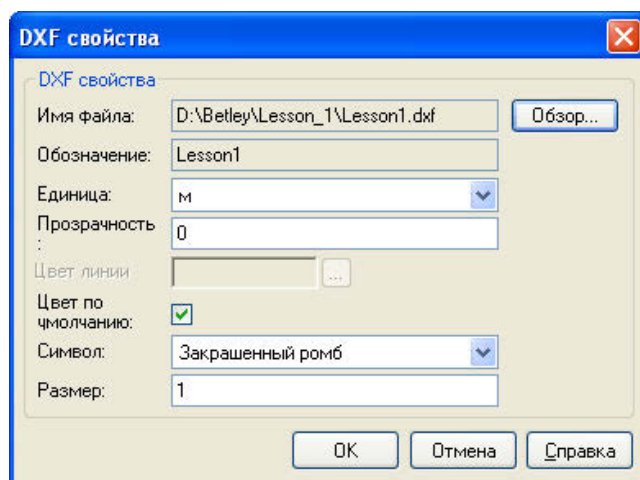



Рис. 2.7. Свойства фонового слоя

Если после нажатия кнопки *OK* слой не появится на экране, нажмите кнопку  на панели инструментов.

## 2.3. Построение схемы сети

На рис. 2.8 показана схема сети, которую вам предстоит построить с использованием фонового слоя.

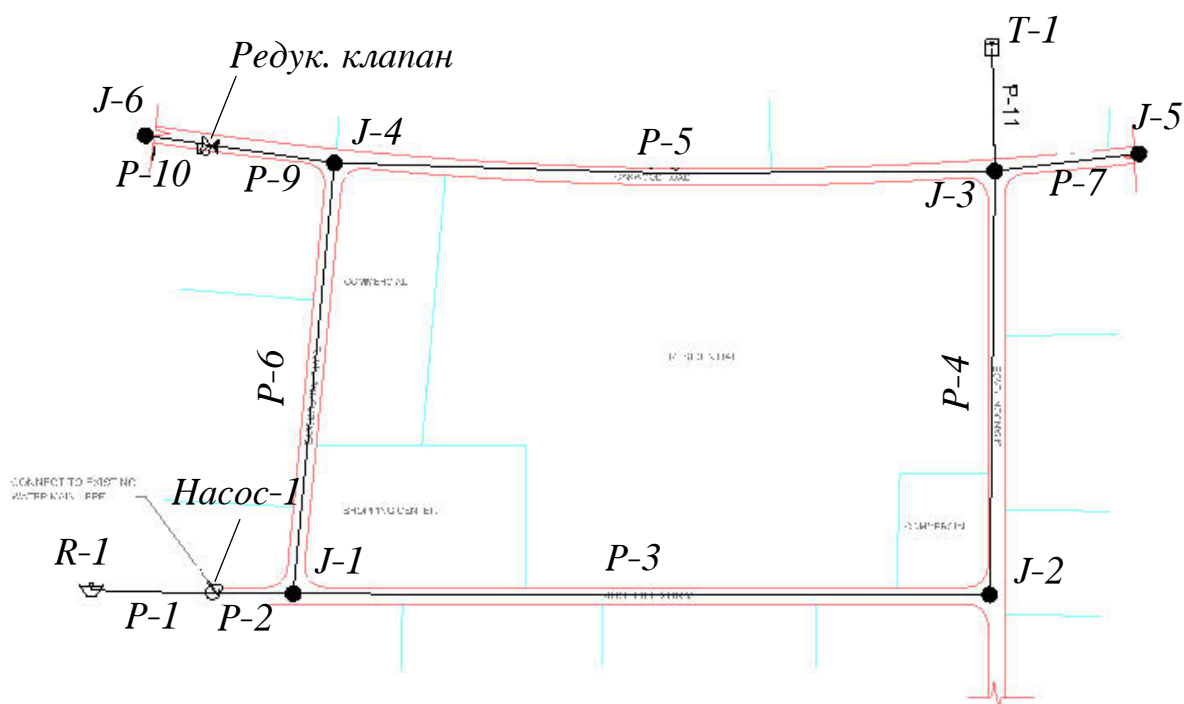



Рис. 2.8. Схема сети

---

Она включает следующие элементы:

- источник водоснабжения (резервуар) R-1;
- насос;
- узлы сети J-1... J-6;
- трубопроводы P-1... P-11;
- резервуар с регулируемым уровнем (водонапорную башню) T-1;
- редукционный клапан.

Для размещения на схеме каждого элемента предназначен соответствующий инструмент, но можно воспользоваться и универсальным инструментом  – *Труба*. Действуйте в следующей последовательности.

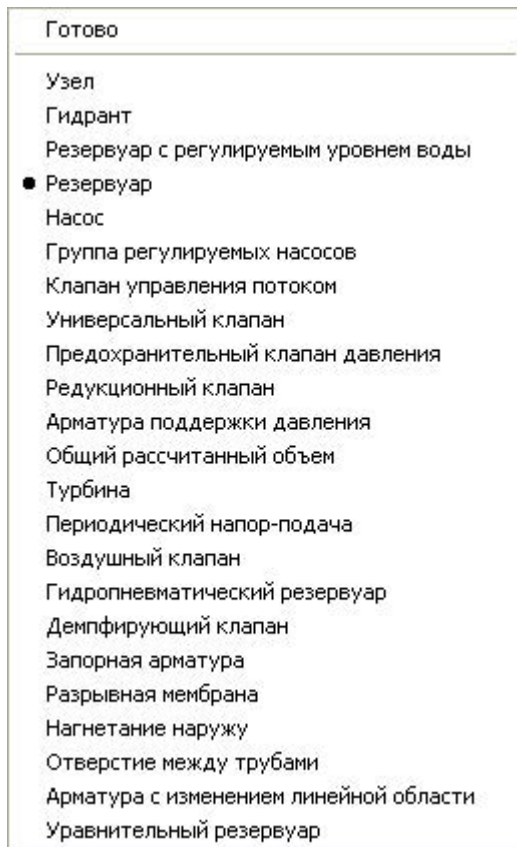


Рис. 2.9. Контекстное меню инструмента «Труба»

После выбора инструмента *Труба* на панели элементов сети переместите курсор в окно схемы сети и нажмите правую кнопку мыши для открытия контекстного меню. В нем выберите пункт *Резервуар* (рис. 2.9).

Щелчком левой клавиши разместите резервуар R-1 на схеме сети.

Переместите курсор в точку расположения насоса и нажмите правую кнопку мыши.

В контекстном меню выберите пункт *Насос* и разместите его на схеме щелчком левой клавиши.

Нажмите правую кнопку мыши, в меню выберите пункт *Узел* и разместите узел J-1 на схеме сети.

Щечками левой клавиши разместите на схеме узлы J-2, J-3 и J-4.

Для изображения трубы P-6 щелкните по узлу J-1. Нажмите правую кнопку мыши, в меню выберите пункт *Готово*.

Результат вашей работы на этом этапе должен соответствовать рис. 2.10. Имейте в виду, что ошибочные действия можно отменить.

---

Если нумерация элементов не будет совпадать с указанной, то позднее вы сможете ее исправить.

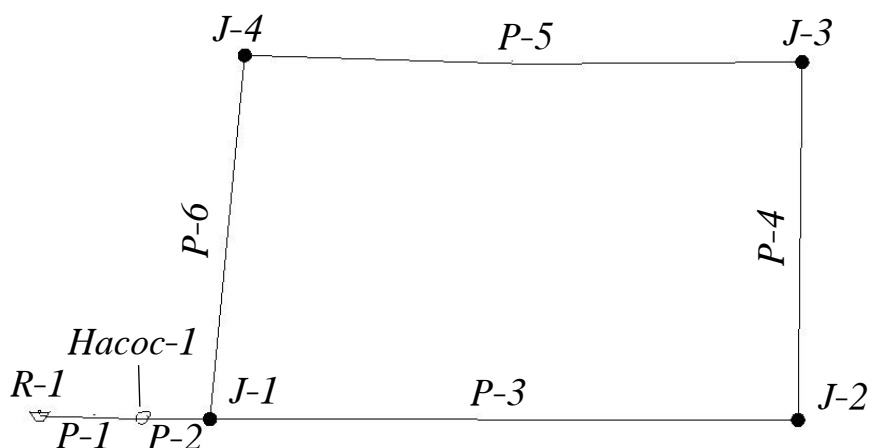



Рис. 2.10. Схема сети на первом этапе построения

Теперь разместите узел J-5. Для этого выполните следующие действия.

Вновь активизируйте инструмент  – Труба. Щелкните по изображению узла J-3 на схеме. Переместите курсор в точку расположения узла J-5 и установите его щелчком левой клавиши. Завершите построение с помощью пункта *Готово* контекстного меню (можно дважды нажать клавишу Esc клавиатуры).

Сеть, которую вы должны построить на данном этапе работы, показана на рис. 2.11.

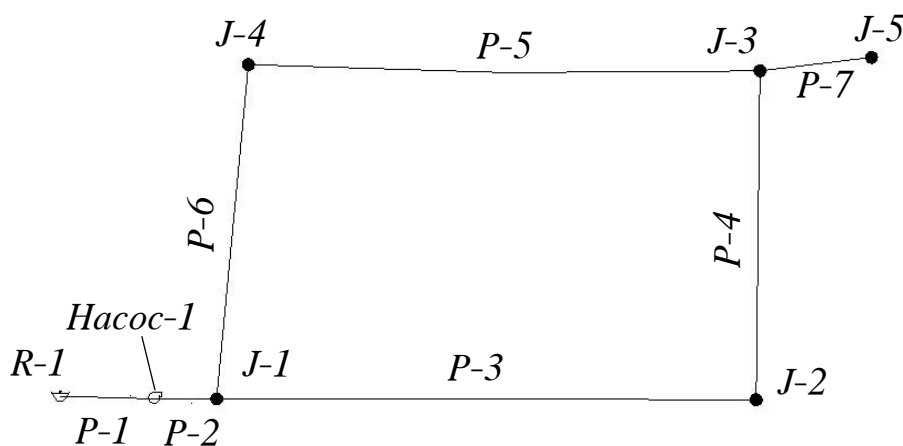


Рис. 2.11. Схема сети на втором этапе построения

Действуя в аналогичной последовательности, установите узел J-6, соединенный трубой с узлом J-4.

Далее между узлами J-6 и J-4 нужно установить *Редукционный клапан*. Его точное положение сейчас не имеет значения, поэтому просто щелкните приблизительно в середине трубы P-8. При этом программа автоматически выполнит ее разделение и установит клапан (рис. 2.12).

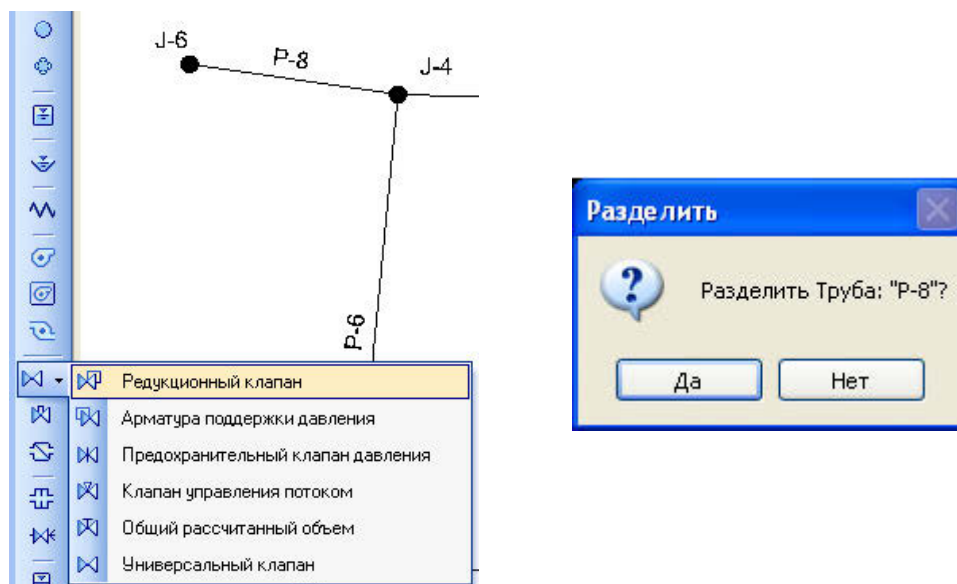



Рис. 2.12. Установка редукционного клапана

Самостоятельно разместите на схеме *Резервуар с регулируемым уровнем*  (водонапорную башню) и соедините его с узлом J-3. Результат вашей работы должен быть аналогичен заданной схеме (см. рис. 2.8). После завершения построений обязательно сохраните проект.

## 2.4. Ввод и редактирование параметров элементов сети

Ввод и редактирование параметров элементов сети можно выполнять несколькими способами:

- с помощью диалоговых окон свойств элементов;
- с помощью таблиц Flex Tables, которые позволяют редактировать свойства всех элементов того или иного типа одновременно;
- с помощью инструмента расширения данных пользователя, который позволяет осуществлять импорт (экспорт) данных из xml-файлов;

– с помощью так называемых альтернатив, которые используются для получения ответов на вопросы типа «Что будет, если... ?».

### 2.4.1. Резервуар

Резервуары – это элементы схемы, использующиеся для моделирования источников воды, объем которых можно считать бесконечно большим. К ним относятся поверхностные источники (озера, пруды), запасные емкости, резервуары чистой воды фильтровальных станций и т. п.

Обязательным атрибутом резервуара является вертикальная отметка – уровень воды над плоскостью сравнения (рис. 2.13).

Для получения доступа к окну свойств резервуара R-1, как и любого другого элемента сети, необходимо дважды щелкнуть по его изображению на схеме. Введите значение уровня воды (вертикальной отметки) 198 м.

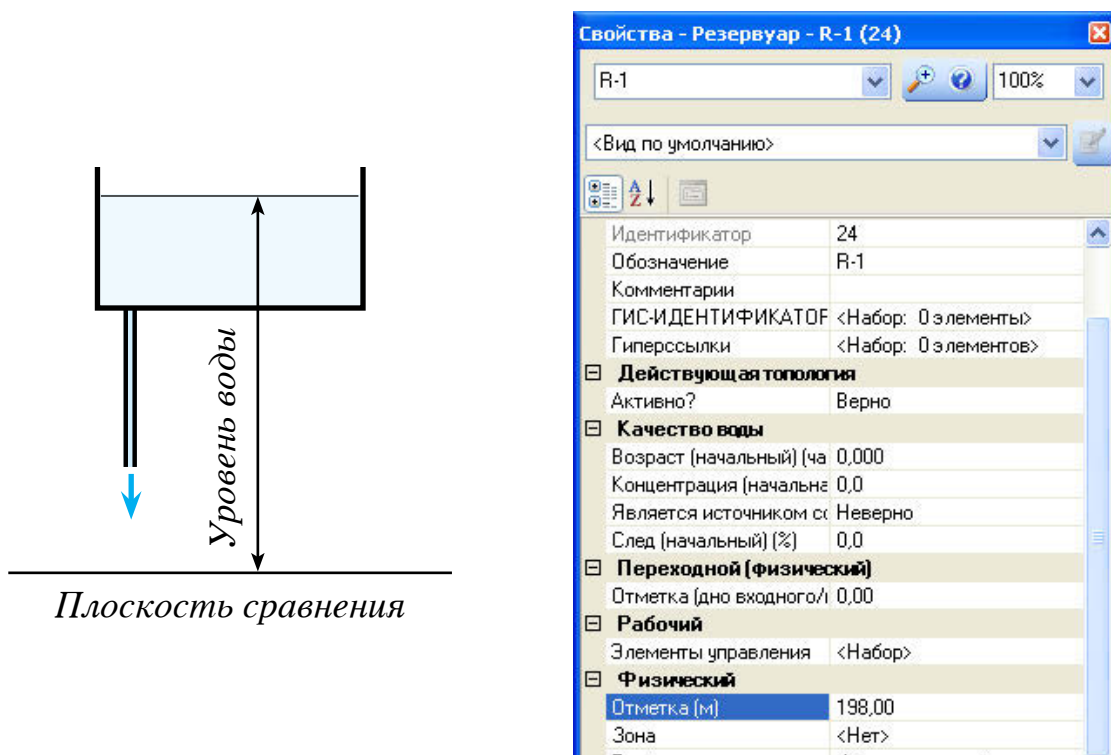


Рис. 2.13. Резервуар

Если обозначение резервуара отличается от указанного, то исправьте его.

## 2.4.2. Резервуар с регулируемым уровнем

Резервуар с регулируемым уровнем (Т-1 на рис. 2.8) имеет конечный объем и в течение времени может наполняться или опорожняться. Эти элементы предназначены для моделирования водонапорных башен, размеры и формы которых могут быть самыми разными.

Наиболее важными атрибутами резервуара являются :

- высота (отметка) основания резервуара над плоскостью сравнения;
- начальный уровень воды (уровень в нулевой момент при расчетах изменения параметров сети во времени);
- минимальный уровень;
- максимальный уровень;
- площадь поперечного сечения резервуара или закон ее изменения в зависимости от уровня воды.

Двойным щелчком откройте окно свойств резервуара Т-1 и введите значения параметров, показанные на рис. 2.14 (характерные высоты, форму сечения и диаметр). Параметр *Зона* здесь и далее можно не указывать.

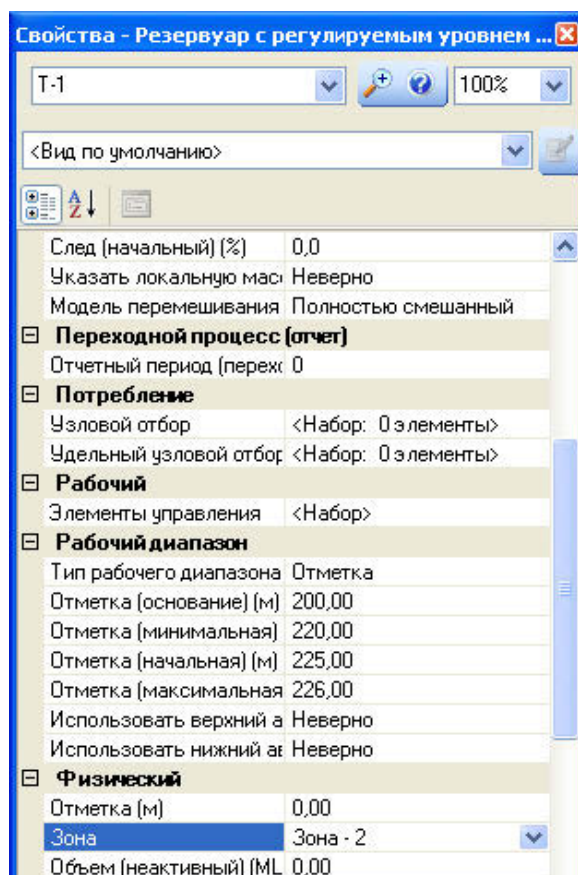
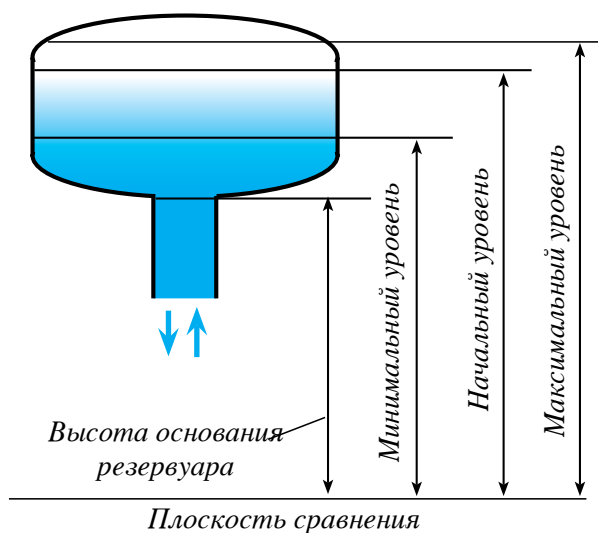


Рис. 2.14. Резервуар с регулируемым уровнем



---

### 2.4.3. Насос

Насосы являются основными источниками механической энергии жидкости в сетях водоснабжения. Обычно используются центробежные насосы с постоянной или переменной (с частотным регулированием) скоростью вращения рабочего колеса (рис. 2.15).

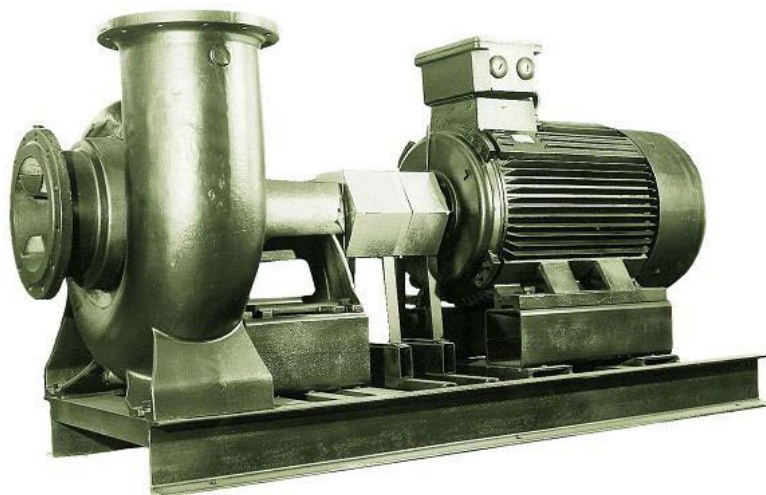


Рис. 2.15. Центробежный насос

Прирост напора воды в насосе,  $\Delta H_p$ , и его производительность (подача),  $Q_p$ , связаны друг с другом определенной зависимостью, которая называется главной или расходно-напорной характеристикой (рис. 2.16).

При изменении производительности меняются и другие важные с практической точки зрения параметры: коэффициент полезного действия,  $\eta$ , потребляемая мощность,  $N$ .

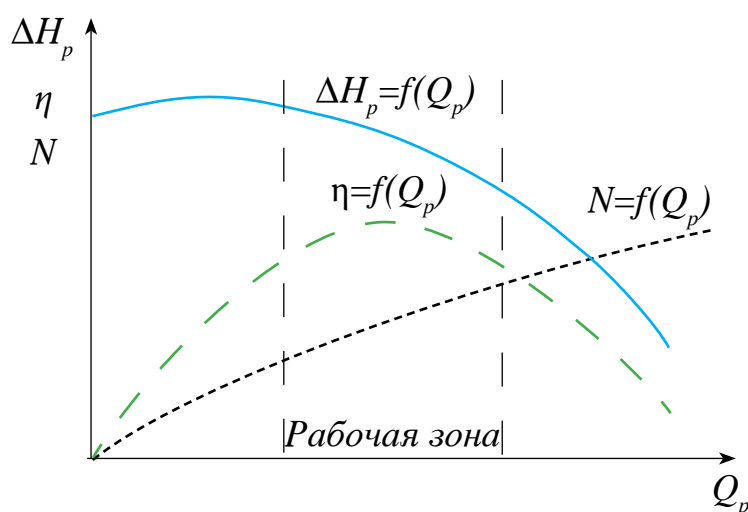


Рис. 2.16. Рабочие характеристики центробежного насоса

Для гидравлического расчета наибольшее значение имеет главная характеристика, поскольку именно она определяет напор и подачу насоса в конкретной сети. Часть этой характеристики, соответствующая максимальным значениям КПД, называется рабочей зоной.

Перед началом расчетов расходно-напорную характеристику используемого насоса необходимо ввести. Для этого активизируйте пункт главного меню **Компоненты – Определения насоса...**

В открывшемся окне *Характеристики насоса* нажмите кнопку *Создать* и введите наименование характеристики, например, *Насос 1*. Укажите, что характеристика будет построена по трем точкам (рис. 2.17).

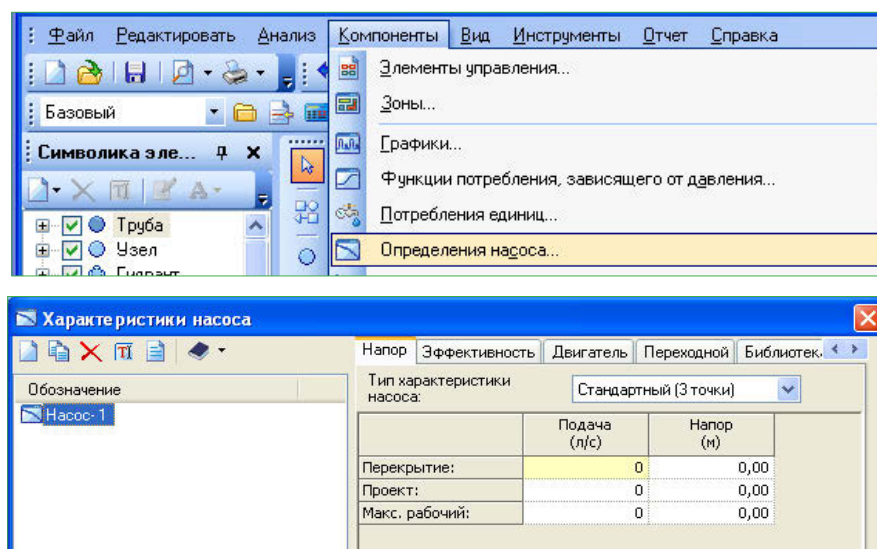


Рис. 2.17. Ввод характеристики насоса

Размерность подачи должна быть л/с, а напора – м. Если это не так, то щелчком правой кнопки по наименованию колонки *Подача* откройте окно его опций и установите требуемую размерность (рис. 2.18). В пункте *Четкость отображения* указывается количество знаков после запятой.

Введите значения подачи и напора, показанные на рис. 2.19. Программа автоматически отобразит введенные данные в виде графика.

В нижней части графика программа показывает рассчитанные ею коэффициенты аппроксимирующей кривой:

$$\Delta H_p = a - bQ_p^c.$$



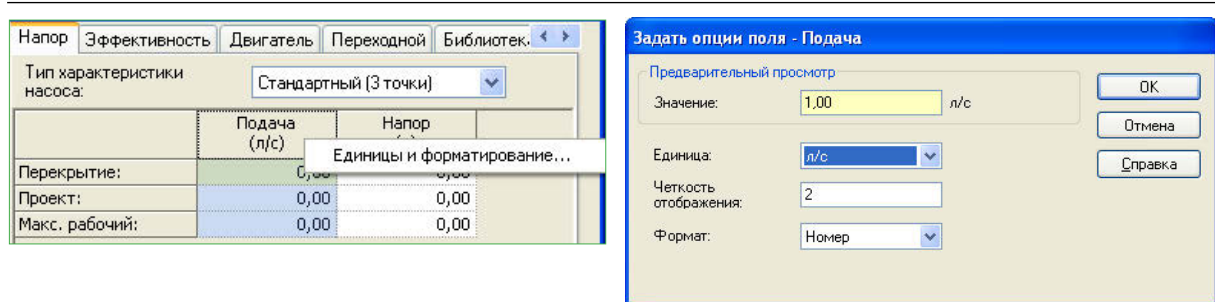


Рис. 2.18. Установка единиц измерения подачи

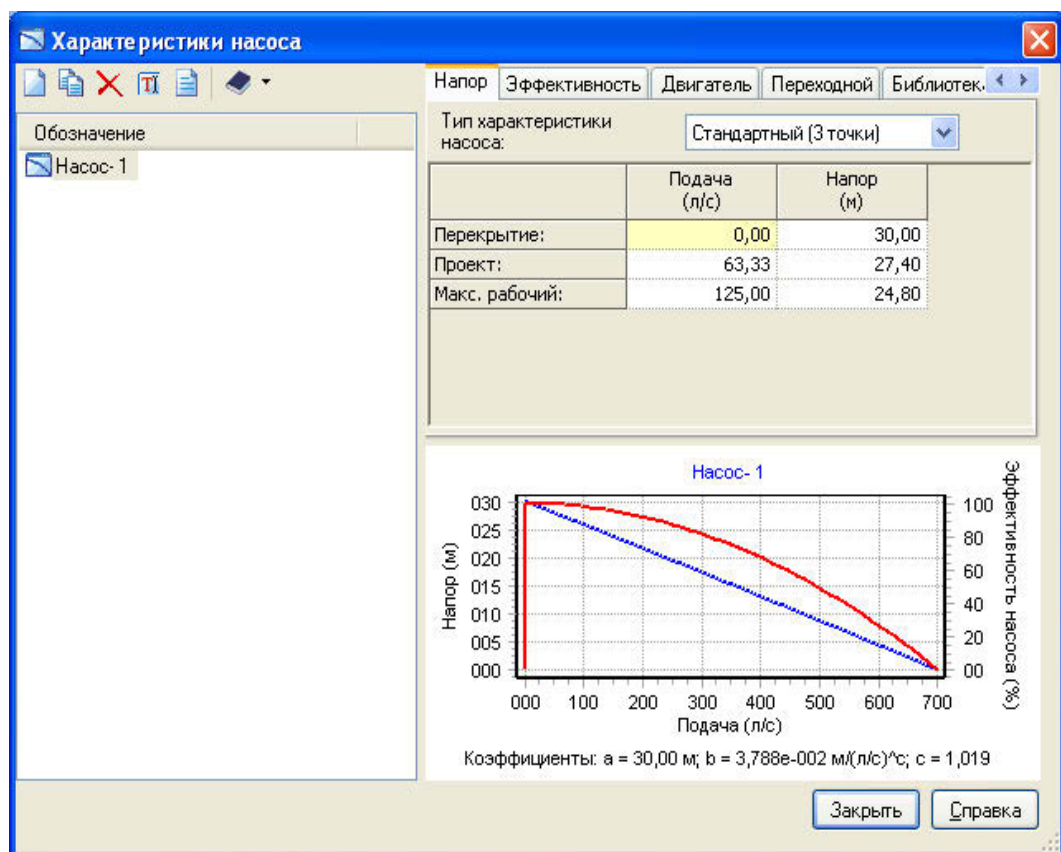


Рис. 2.19. Характеристика насоса

Далее закройте окно характеристик и двойным щелчком откройте окно свойств насоса. Введите высоту расположения оси насоса (*Отметка*) 193 м и установите введенную характеристику *Насос-1* в качестве рабочей (рис. 2.20).

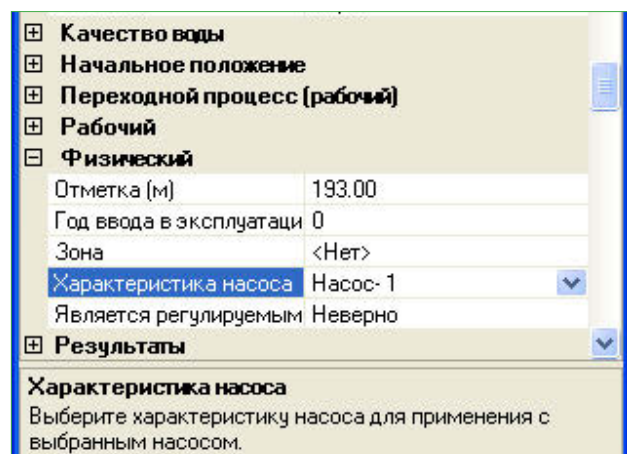


Рис. 2.20. Свойства насоса

---

Отметим, что если пользователь не имеет сведений о характеристике насоса, то WaterGEMS предоставляет ему возможность рассчитать ее приблизительно по параметрам единственной номинальной точки.

В ходе моделирования работы сети с насосной подачей воды программа осуществляет совместное решение системы уравнений сети и аппроксимирующей кривой характеристики насоса. Графически решение представляет собой точку пересечения двух характеристик – сети и насоса. Эту точку называют рабочей (рис. 2.21).

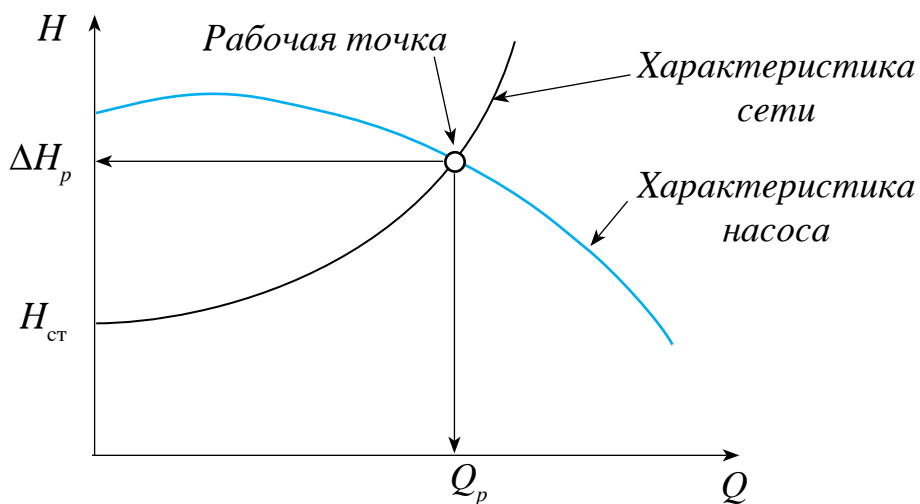


Рис. 2.21. Определение рабочей точки

Потребление воды в реальных сетях изменяется во времени. Следовательно, изменяется производительность насосов и создаваемые ими напоры: при уменьшении водопотребления (например, в ночные часы) напор в сети возрастает, а в часы наибольшего водопотребления напор оказывается минимальным.

Эта особенность работы центробежных насосов является их основным недостатком. Рост напора может привести к разрушению трубопроводов, а при его падении ухудшается водоснабжение потребителей. Кроме того, режим работы может выходить за пределы рабочей зоны насоса, приводя к снижению КПД и перерасходу энергии.

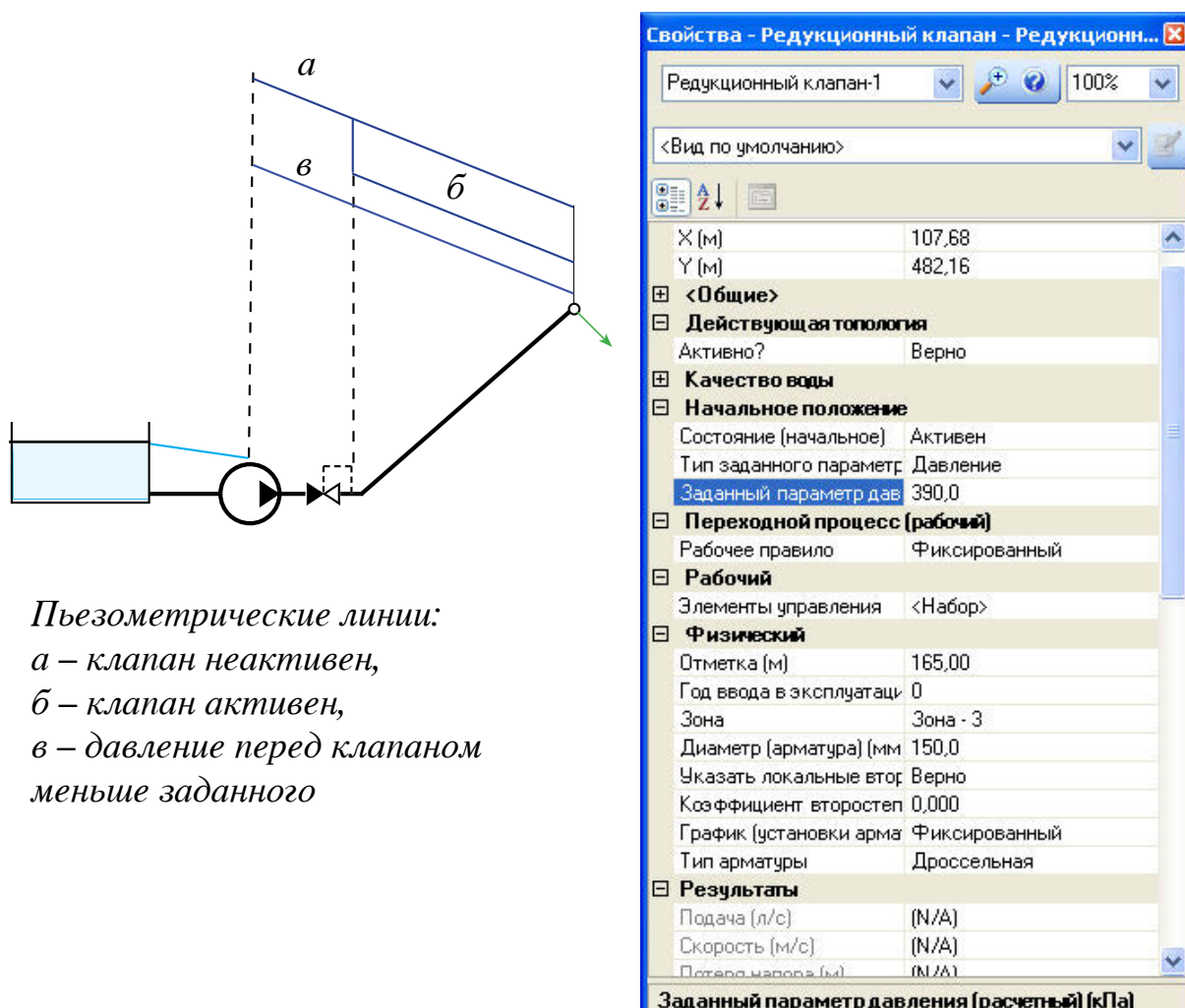
С этой точки зрения желательно, чтобы характеристика насоса была как можно более пологой, т. е. чтобы напор насоса мало изменялся при изменении его подачи.

#### 2.4.4. Редукционный клапан

Редукционный клапан – это устройство, которое поддерживает давление в трубопроводе за собой (т. е. ниже по течению жидкости) не выше заданного значения настройки.

Если давление в потоке перед клапаном меньше давления настройки, то он полностью открыт. Если давление в потоке превышает давление настройки, программа автоматически снижает давление за клапаном до заданного. При расчетах задаются: статус клапана, давление настройки и коэффициент гидравлического сопротивления полностью открытого клапана.

Двойным щелчком откройте окно его свойств и введите значения параметров, приведенные в нашем примере (рис. 2.22): состояние (активен), тип заданного параметра (давление), заданный параметр (390 кПа), отметка (165 м), диаметр (150 мм).



The diagram on the left shows a piping system with a tank, a pump, and a pressure-reducing valve. Three piezometric lines are shown: 'a' (inactive valve), 'b' (active valve), and 'v' (pressure before the valve). The properties window on the right is titled 'Свойства - Редукционный клапан - Редукционн...' and contains the following data:

Редукционный клапан-1	
<Вид по умолчанию>	
X (м)	107,68
Y (м)	482,16
<b>&lt;Общие&gt;</b>	
<b>Действующая топология</b>	
Активно?	Верно
<b>Качество воды</b>	
<b>Начальное положение</b>	
Состояние (начальное)	Активен
Тип заданного параметра	Давление
Заданный параметр дав	390,0
<b>Переходной процесс (рабочий)</b>	
Рабочее правило	Фиксированный
<b>Рабочий</b>	
Элементы управления	<Набор>
<b>Физический</b>	
Отметка (м)	165,00
Год ввода в эксплуатац	0
Зона	Зона - 3
Диаметр (арматура) (мм)	150,0
Указать локальные втор	Верно
Коэффициент второстеп	0,000
График (установки арма	Фиксированный
Тип арматуры	Дроссельная
<b>Результаты</b>	
Подача (л/с)	(N/A)
Скорость (м/с)	(N/A)
Потери напора (м)	(N/A)
Заданный параметр давления (расчетный) (кПа)	

*Пьезометрические линии:*  
*а – клапан неактивен,*  
*б – клапан активен,*  
*в – давление перед клапаном*  
*меньше заданного*

Рис. 2.22. Свойства редукционного клапана

### 2.4.5. Узлы сети

Узлы – это точки, в которых соединяются друг с другом отдельные трубопроводы и осуществляется отбор воды потребителями.

Для каждого узла необходимо задать минимум два параметра: высоту расположения относительно плоскости сравнения и величину узлового отбора. По умолчанию их значения нулевые.

Откройте окно свойств какого-либо узла, например, J-2 (рис. 2.23) Для ввода величины узлового отбора нажмите кнопку с изображением многоточия в соответствующей графе. В окне *Потребления* введите значение отбора.

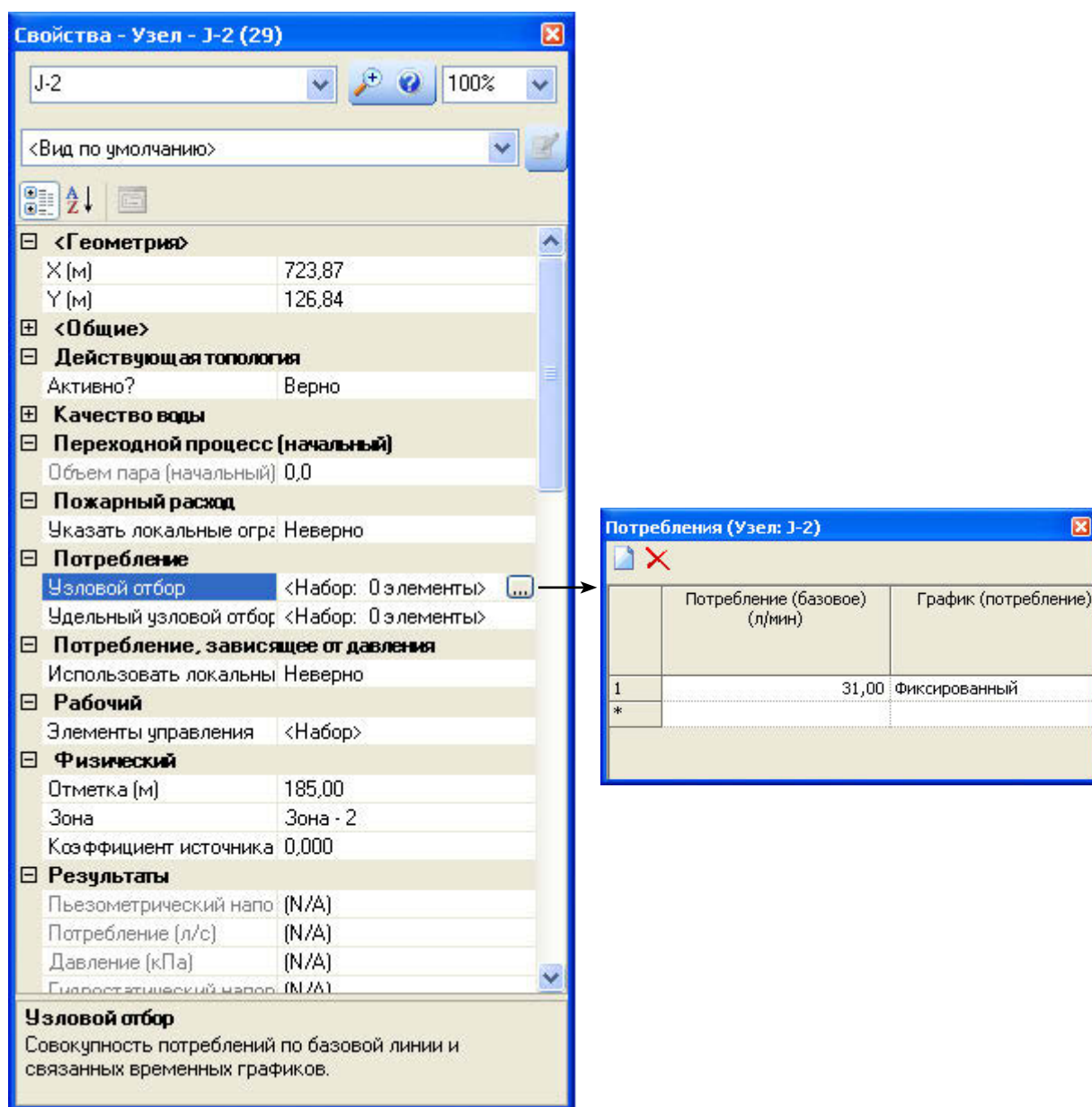


Рис. 2.23. Свойства узла и ввод значения отбора

---

Обратите внимание, что размерность отбора – л/мин. При необходимости измените ее по аналогии с ранее рассмотренным примером.

Убедитесь, что обозначения всех узлов соответствуют заданной схеме, и введите их высотные отметки и отборы согласно табл. 2.1.

Таблица 2.1

Высотные отметки и узловые отборы

Узел	Отметка (м)	Отбор (л/мин)
J-1	184	38
J-2	185	31
J-3	184	34
J-4	183	38
J-5	185,5	350
J-6	165	356

#### 2.4.6. Трубопроводы

Для каждого трубопровода необходимо указать минимум три параметра: длину, диаметр и материал.

Откройте окно свойств трубопровода Р-1. Обратите внимание, что его длина уже имеет некоторое значение, отличное от нуля. По умолчанию она определена программой автоматически в соответствии с масштабом фонового слоя. Довольно часто длины приходится корректировать. Короткие трубопроводы, изображенные в масштабе, иногда трудно различимы на схеме. Поэтому некоторые трубопроводы, как в случае Р-1, изображаются условно.

Другая причина несоответствия реальной длины и рассчитанной по масштабу в том, что сеть – пространственный объект, а наша схема – ее проекция на горизонтальную плоскость (рис. 2.24).

Для исправления длины трубопровода Р-1 нужно указать, что он имеет длину, определяемую пользователем, и ввести необходимое значение. В данном примере это всего 0,01 м. Диаметр 1000 мм. Остальные параметры принимаются по умолчанию (рис. 2.25).

Ввод и редактирование данных для группы однотипных элементов можно ускорить, если представить их в виде таблицы Flex Tables.



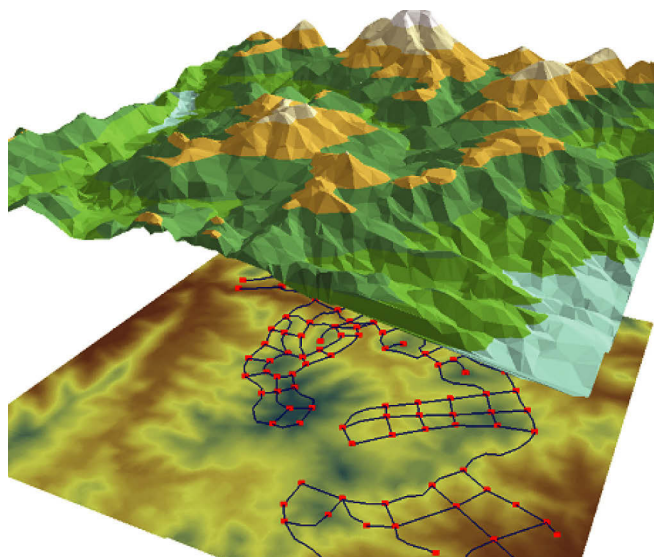


Рис. 2.24. Проекция сети на плоскость

Свойства - Труба - P-1 (26)


P-1

<Вид по умолчанию>

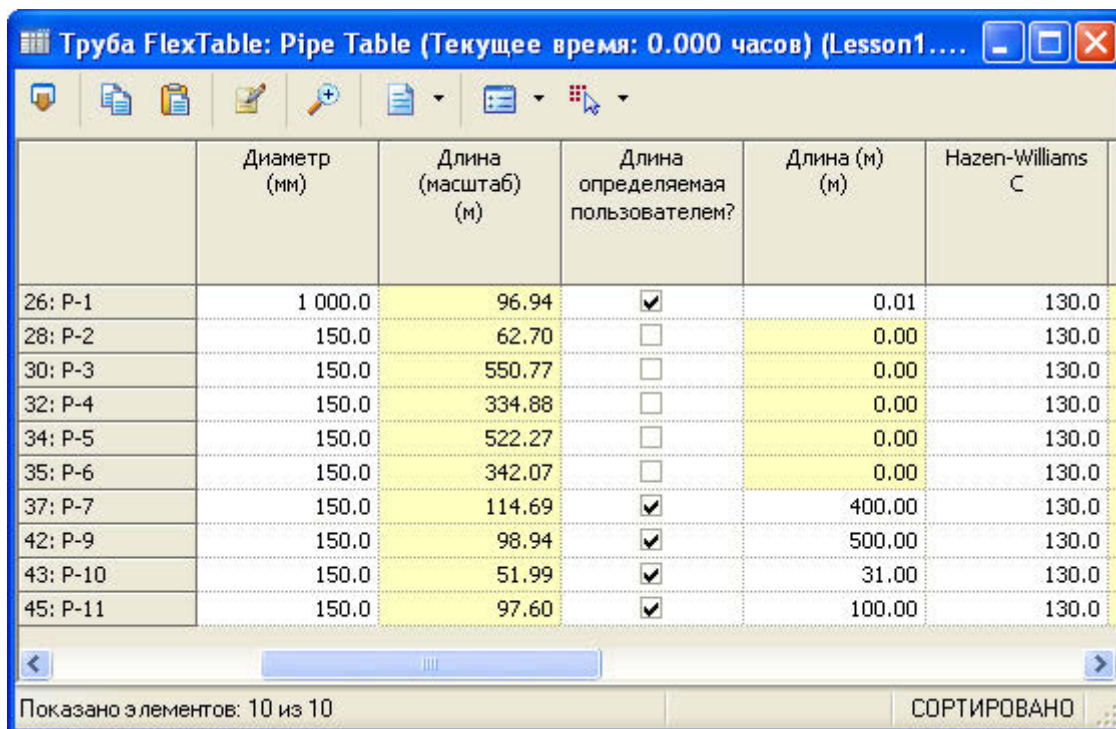
Конечный узел	Насос-1
Изменение направления	<Обратный пуск/останов>
<input checked="" type="checkbox"/> Действующая топология	
Активно?	Верно
<input checked="" type="checkbox"/> Качество воды	
<input checked="" type="checkbox"/> Начальное положение	
Состояние (начальное)	Открыть
<input checked="" type="checkbox"/> Переходной (физический)	
Скорость волны (м/с)	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Рабочий	
Элементы управления	<Набор>
<input checked="" type="checkbox"/> Физический	
Зона	<Нет>
Диаметр (мм)	1 000,0
Материал	Ductile Iron
C по формуле Хазен-Вильямса	130,0
Имеет определяемую пользователем длину?	Верно
Длина (определяемая пользователем) (м)	0,01
Имеет запорную арматуру?	Неверно
Указать локальные второстепенные потери?	Верно
Коэффициент второстепенных потерь (локал)	0,000
Год ввода в эксплуатацию	0
<input checked="" type="checkbox"/> Результаты	
Подача (л/с)	(N/A)
Скорость (м/с)	(N/A)
Удельные потери (м/м)	(N/A)
Потери напора (м)	(N/A)

**Имеет определяемую пользователем длину?**  
 Позволяет переопределять рассчитанные масштабированные длины труб на определяемое пользователем значение.

Рис. 2.25. Свойства трубопровода


Для открытия таблиц Flex Tables нажмите кнопку  или воспользуйтесь пунктом главного меню **Вид – FlexTables**. Двойным щелчком откройте таблицу *Труба*.


В таблицу необходимо ввести параметры, указанные в нашем примере (рис. 2.26). Обратите внимание, что последовательность колонок и их наименования могут отличаться от указанных. Поля, отмеченные на экране желтым цветом, не редактируются.



	Диаметр (мм)	Длина (масштаб) (м)	Длина определяемая пользователем?	Длина (м)	Hazen-Williams C
26: P-1	1 000.0	96.94	<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	130.0
28: P-2	150.0	62.70	<input type="checkbox"/>	0.00	130.0
30: P-3	150.0	550.77	<input type="checkbox"/>	0.00	130.0
32: P-4	150.0	334.88	<input type="checkbox"/>	0.00	130.0
34: P-5	150.0	522.27	<input type="checkbox"/>	0.00	130.0
35: P-6	150.0	342.07	<input type="checkbox"/>	0.00	130.0
37: P-7	150.0	114.69	<input checked="" type="checkbox"/>	400.00	130.0
42: P-9	150.0	98.94	<input checked="" type="checkbox"/>	500.00	130.0
43: P-10	150.0	51.99	<input checked="" type="checkbox"/>	31.00	130.0
45: P-11	150.0	97.60	<input checked="" type="checkbox"/>	100.00	130.0

Рис. 2.26. Параметры труб

Если какое-либо поле, например, *Материал* отсутствует в таблице, нажмите кнопку  – *Редактировать*. Найдите необходимый параметр в списке доступных столбцов окна *Таблица* и нажмите кнопку *Добавить* (рис. 2.27). При желании вы можете изменить последовательность столбцов или удалить их из таблицы.

Для изменения материала установите курсор на соответствующее поле и нажмите кнопку . Тем самым вы получите доступ к техническим библиотекам, из которых и следует выбрать необходимый материал (рис. 2.28). В нашем примере все трубы чугунные.

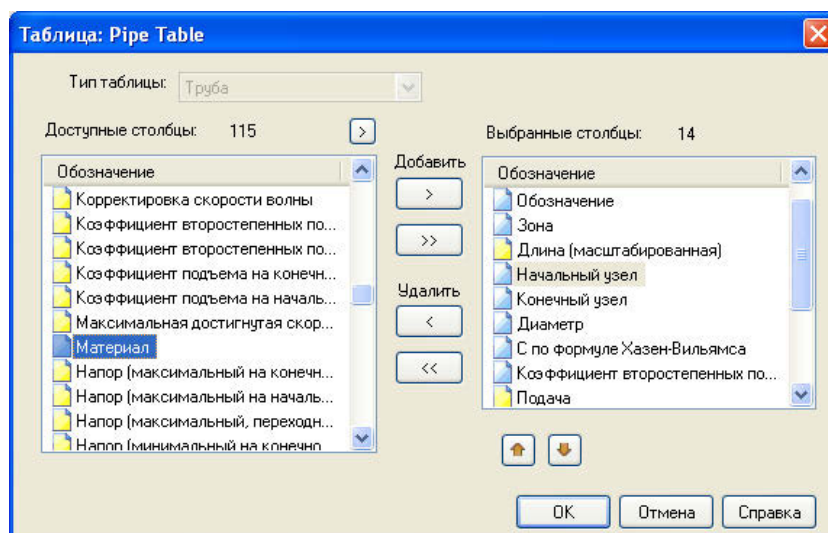


Рис. 2.27. Редактирование таблицы

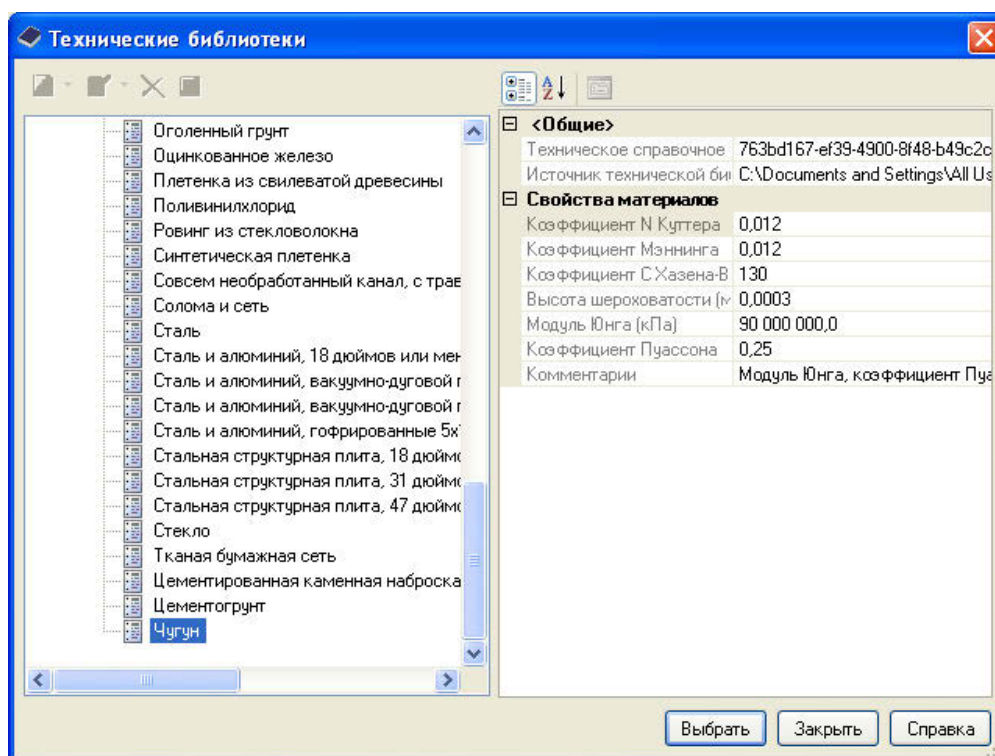


Рис. 2.28. Библиотека материалов труб

Обратите внимание, что значение коэффициента шероховатости  $C$  (коэффициент Хазена – Вильямса) устанавливается автоматически в соответствии с выбранным материалом. Тем не менее, вы можете при необходимости его изменить.

Значения остальных параметров оставьте без изменения. Завершите работу с таблицей.



## 2.5. Гидравлический расчет сети в стационарном режиме

Теперь все готово для выполнения гидравлического расчета сети при значениях ее параметров, неизменных во времени.

Сначала познакомьтесь с некоторыми параметрами расчета. Для этого воспользуйтесь пунктом главного меню **Анализ – Опции расчета** (рис. 2.29).

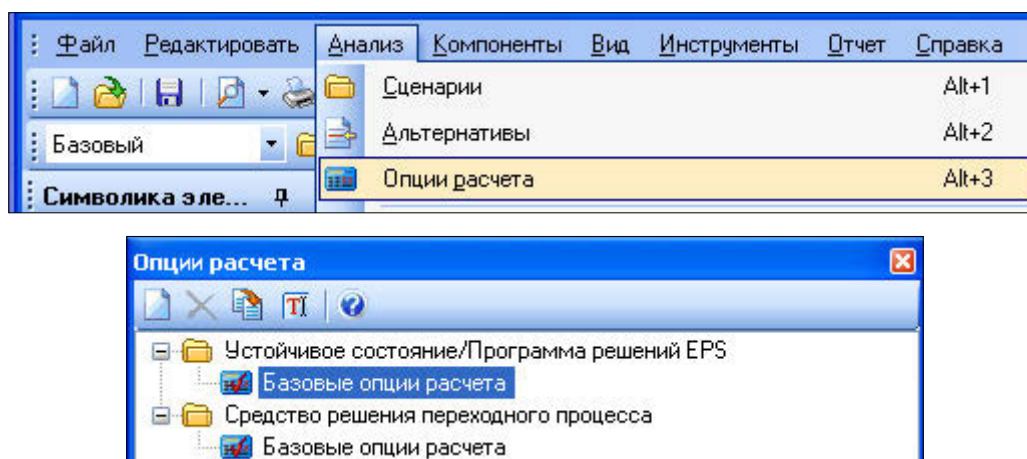


Рис. 2.29. Окно опций расчета

Двойным щелчком по пункту *Базовые опции расчета (Устойчивое состояние / Программа решений EPS)* откройте окно *Свойства – Опции расчета*. Убедитесь, что в графе *Тип временного анализа* указано *Устойчивое состояние* (рис. 2.30).

Закройте это окно, поскольку пока оно вам не понадобится.

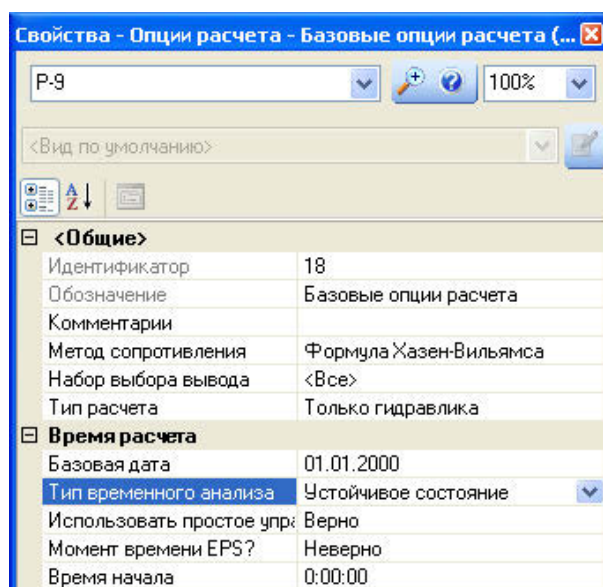


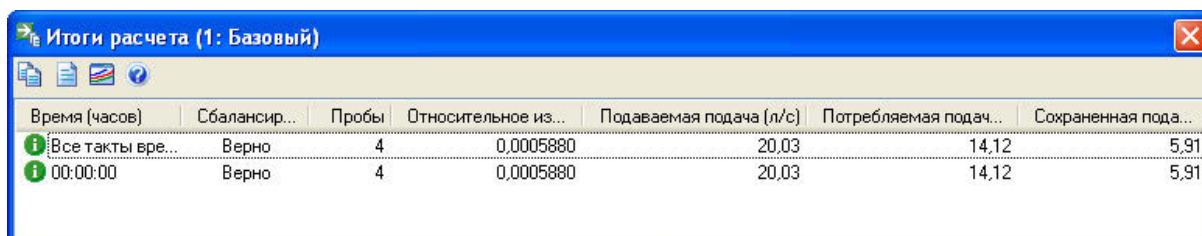


Рис. 2.30. Окно базовых опций расчета

Перед началом расчета нажмите кнопку  – *Проверить*. Программа проверит правильность конфигурации схемы и корректность параметров ее элементов.

Запустите расчет с помощью кнопки . После его завершения на экран будет выведено окно, содержащее общие итоги (рис. 2.31).





Время (часов)	Сбалансир...	Пробы	Относительное из...	Подаваемая подача (л/с)	Потребляемая подач...	Сохраненная пода...
 Все такты вре...	Верно	4	0,0005880	20,03	14,12	5,91
 00:00:00	Верно	4	0,0005880	20,03	14,12	5,91

Рис. 2.31. Общие итоги расчета

Успешно завершенные этапы расчета отмечаются зеленым индикатором, предупреждения системы – желтым, а красный индикатор показывает наличие какой-то ошибки.

В данном случае расчет выполнен без ошибок. Программа показывает, что насос подает в сеть 20,03 л/с. При этом 14,12 л/с отводится к потребителям в узел сети, а 5,91 л/с поступает в водонапорную башню.

После завершения знакомства с окном итогов расчета закройте его и сохраните проект.

## 2.6. Просмотр результатов расчета

В распоряжении пользователя имеются несколько инструментов для анализа результатов расчета. Проще всего открыть окно свойств интересующего вас элемента. Можно воспользоваться таблицей Flex Tables для элементов того или иного типа.

Здесь рассмотрим способ отображения характера изменения какого-либо параметра, например скорости воды в трубопроводах, с помощью *Цветового кодирования*.

Чтобы отобразить непосредственно на схеме характер изменения скорости, выполните следующие действия.

Установите курсор на пункте *Труба* панели *Символика элементов* и щелчком правой клавиши откройте меню. В нем выберите пункт *Цветовая кодировка* (рис. 2.32).

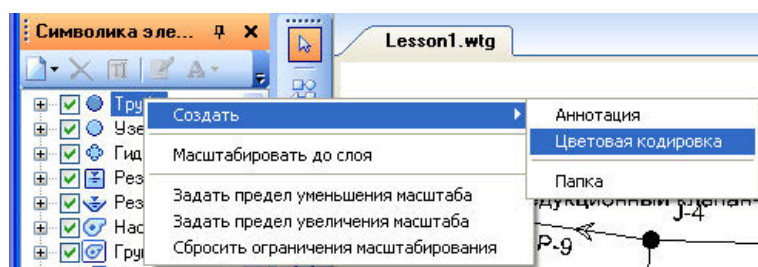


Рис. 2.32. Создание цветовой кодировки

В диалоговом окне *Свойства цветовой кодировки – Труба* в качестве имени поля выберите *Скорость*, нажмите кнопку *Рассчитать диапазон*. Программа выведет на экран минимальное и максимальное значение скорости в рассчитываемой сети (рис. 2.33).

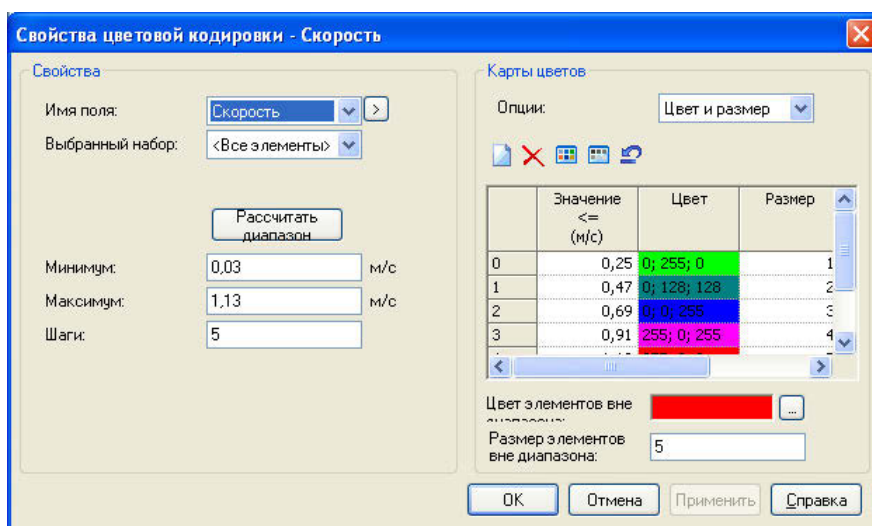



Рис. 2.33. Свойства цветовой кодировки

В поле *Опции* укажите, что значения скоростей в различных диапазонах должны отображаться на схеме не только различными цветами, но и разными размерами элементов (здесь – линиями различной толщины).

Последовательно нажмите кнопки  – *Инициализировать* и *Применить*. Результат этих действий сразу отобразится на схеме сети. При необходимости измените цвета или размеры элементов на *Карте цветов* окна свойств кодировки.

При необходимости карту цветов (размеров) вы можете разместить непосредственно на схеме в виде *Легенды* (рис. 2.34).

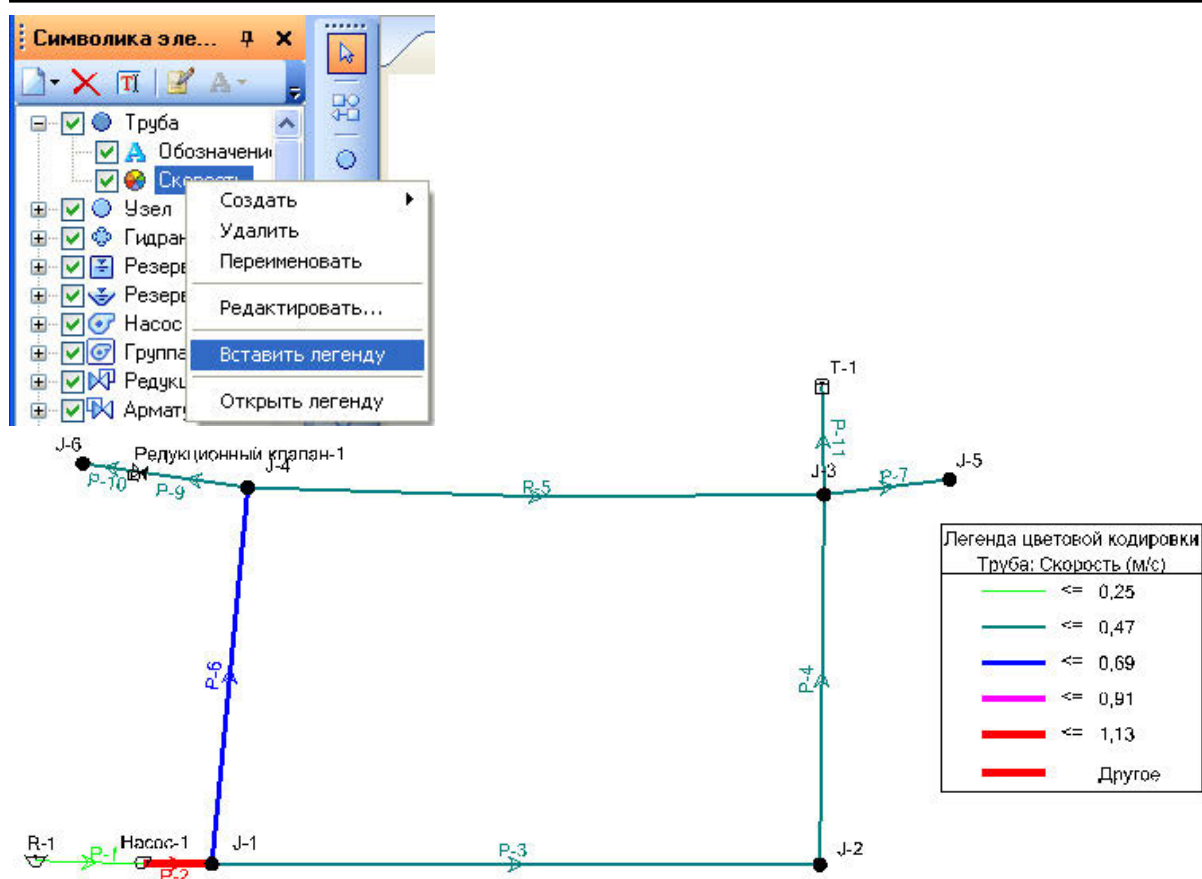


Рис. 2.34. Результаты расчета скоростей в виде цветового кодирования

Значения вычисленных параметров можно отображать непосредственно на схеме сети в виде *Аннотаций*. Для их создания установите курсор на пункте *Труба* панели *Символика элементов* и щелчком правой клавиши откройте меню. В нем выберите пункт *Аннотация* (рис. 2.35).

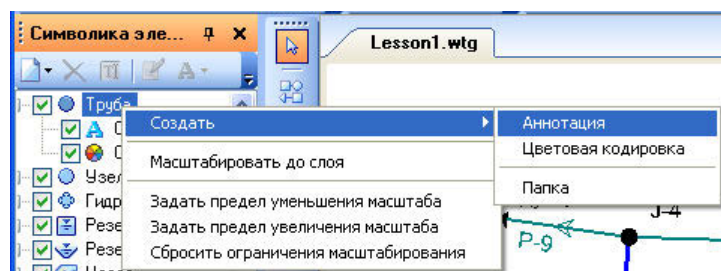



Рис. 2.35. Создание аннотации


Предлагаем вам самостоятельно разместить аннотацию для задачи (расхода).

Сохраните проект после завершения этой части работы.

## 2.7. Построение графиков изменения параметров потока по его длине

WaterGEMS рассчитывает параметры потока только в узлах сети. Поэтому, прежде чем построить график изменения какого-либо параметра, например напора по цепочке трубопроводов, необходимо ее указать, т. е. создать профиль.

С этой целью активизируйте пункт главного меню **Вид – Профили** или нажмите кнопку .

В окне *Профили* создайте новый профиль с помощью кнопки . Откроется новое окно *Установки профиля*, где следует нажать кнопку *Выбрать из схемы* (рис. 2.36).

На экране появится плавающая панель *Выбрать* (рис. 2.37).

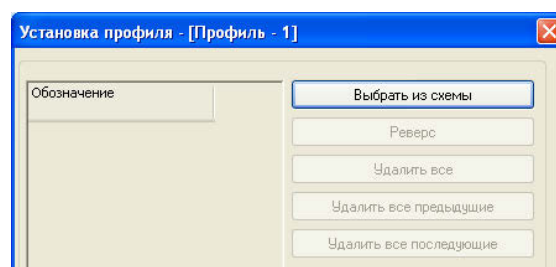



Рис. 2.36. Окно установки профиля



Рис. 2.37. Плавающая панель

Последовательно щелкните левой клавишей по элементам схемы R-1, J-1, J-2, J-3, J-5. Построенная цепочка трубопроводов будет показана красным цветом. После завершения построения нажмите кнопку  на плавающей панели. Результат отобразится в окне *Установки профиля* (рис. 2.38).

Теперь нажмите кнопку *Открыть профиль* этого окна.

По умолчанию программа предложит вам построить

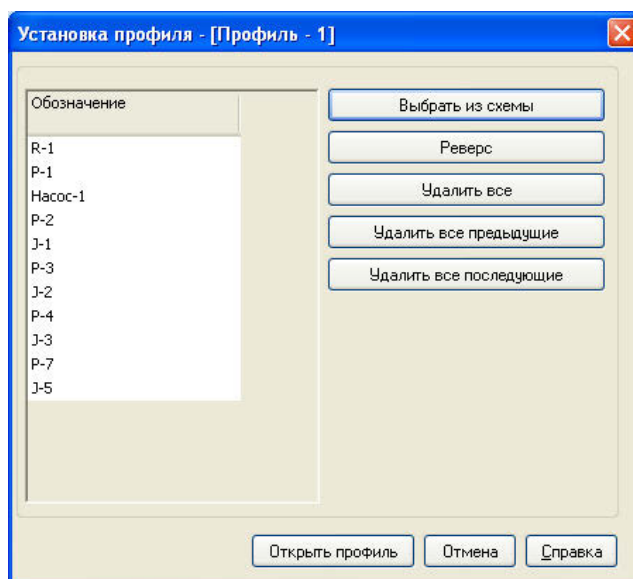


Рис. 2.38. Элементы сети, включенные в профиль



графики изменения пьезометрического напора и высотных отметок узлов (рис. 2.39).

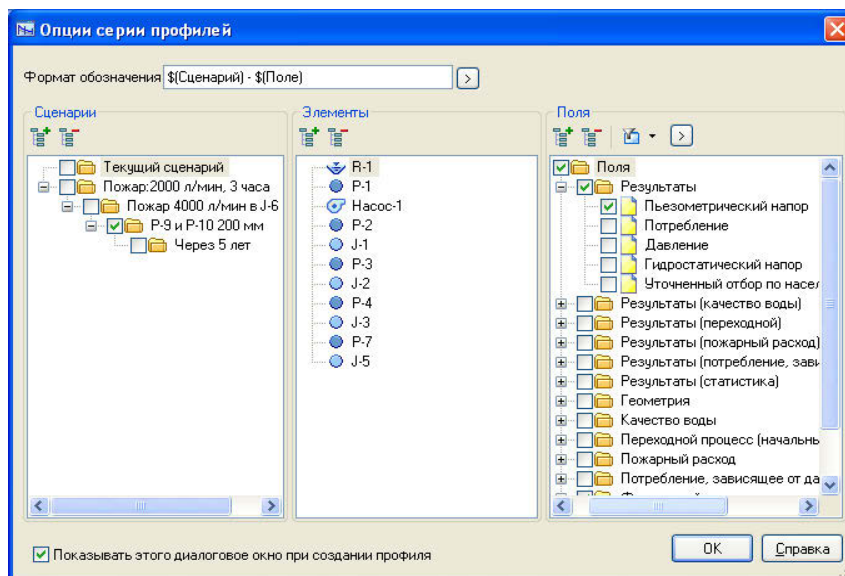


Рис. 2.39. Окно выбора видов (опций) графиков

После нажатия кнопки *ОК* графики будут показаны на экране (рис. 2.40).


При желании вы можете изменить параметры диаграммы с помощью кнопки . Обязательно сохраните проект.



Рис. 2.40. Графики изменения пьезометрического напора и высотных отметок узлов

---

### 3. Анализ работы сети при изменении ее параметров во времени

Теперь вам предстоит познакомиться с возможностями программы WaterGEMS при моделировании работы сети водоснабжения при изменении ее параметров во времени. Этот вид расчета сокращенно обозначается как EPS (Extended Period Simulation). Фактически это несколько последовательно выполняемых расчетов сети в установленном режиме, выполняемых при автоматическом изменении тех или иных параметров в заданных диапазонах с некоторым шагом по времени. Такие расчеты называют квазистационарными.

Они позволяют, например, проследить изменение режима работы насоса, уровня воды в водонапорной башне, поведения регулирующих клапанов и т. п. при изменении потребления воды в течение суток, месяца или даже года.

Далее будет использоваться ранее построенная схема сети.

#### 3.1. Графики водопотребления

В течение времени величины отборов воды потребителями изменяются. Например, в городах оно большое в утренние и вечерние часы, а ночью существенно уменьшается. Имеются различия водопотребления и у потребителей различных групп. В жилых районах оно одно, у предприятий бытового обслуживания (бани, прачечные и т. п.) – другое, у промышленных предприятий – третье и т. д.

Водопотребление постоянно изменяется как в течение суток, так и в течение недели, месяца, года. Это обусловлено различными факторами, связанными с условиями жизни и работы людей, погодой и т. п.

Режим водопотребления можно установить только путем постоянного измерения количества воды, подаваемой в сеть.

Отношение расхода воды, подаваемой в сеть в течение часа,  $Q_{\text{ч}}$ , к среднему за сутки,  $Q_{\text{ср}}$ , называют коэффициентом часовой неравномерности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{Q_{\text{ч}}}{Q_{\text{ср}}}.$$

---

Очевидно, по аналогии можно ввести коэффициенты дневной неравномерности за месяц или за год.

Далее будет рассматриваться только суточная неравномерность. Она моделируется с помощью графиков неравномерности водопотребления для потребителей различных групп.

В программе WaterGEMS водопотребление в те или иные часы отображается на графиках в долях от среднего суточного потребляемого расхода воды (базового расхода). Таким образом, водопотребление в те или иные моменты определяется путем умножения базового расхода на соответствующие коэффициенты  $K_{\text{ч}}$ .

Ранее мы задавали фиксированные отборы во всех узлах сети. Сейчас же условно разделим потребителей на две группы. К одной из них отнесем потребителей, использующих воду на хозяйственно-питьевые нужды (население). Потребители другой группы – предприятия. Для обеих групп нужно создать соответствующие графики неравномерности водопотребления.

Для создания графиков предназначен пункт главного меню **Компоненты – Графики** (рис. 3.1).

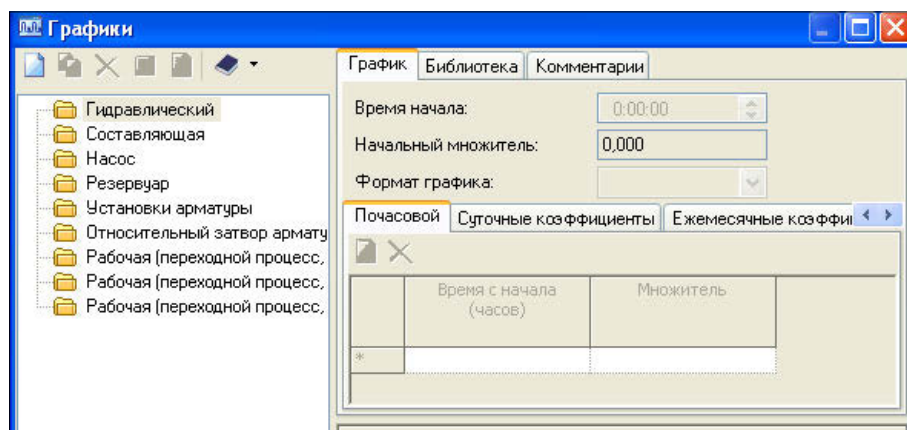



Рис. 3.1. Окно ввода графиков изменения параметров элементов сети во времени

В окне *Графики* с помощью кнопки  создайте новый гидравлический график. Измените (щелчок правой клавиши) заданное по умолчанию наименование графика, назвав его, например, *Население*.

Задайте время начала графика 00:00:00 и начальный множитель (коэффициент неравномерности) – 0,5.



Укажите, что график должен быть ступенчатым.

Введите значения коэффициентов неравномерности (множитель) согласно табл. 3.1. Они автоматически отображаются в виде графика (рис. 3.2).


Для создания графика *Предприятия* снова нажмите кнопку  и измените заданное по умолчанию наименование.

Таблица 3.1

Коэффициенты (множители) неравномерности  
потребления *Население*

Время с начала (часов)	Множитель
3	0,4
6	1,0
9	1,3
12	1,2
15	1,2
18	1,6
21	0,8
24	0,5

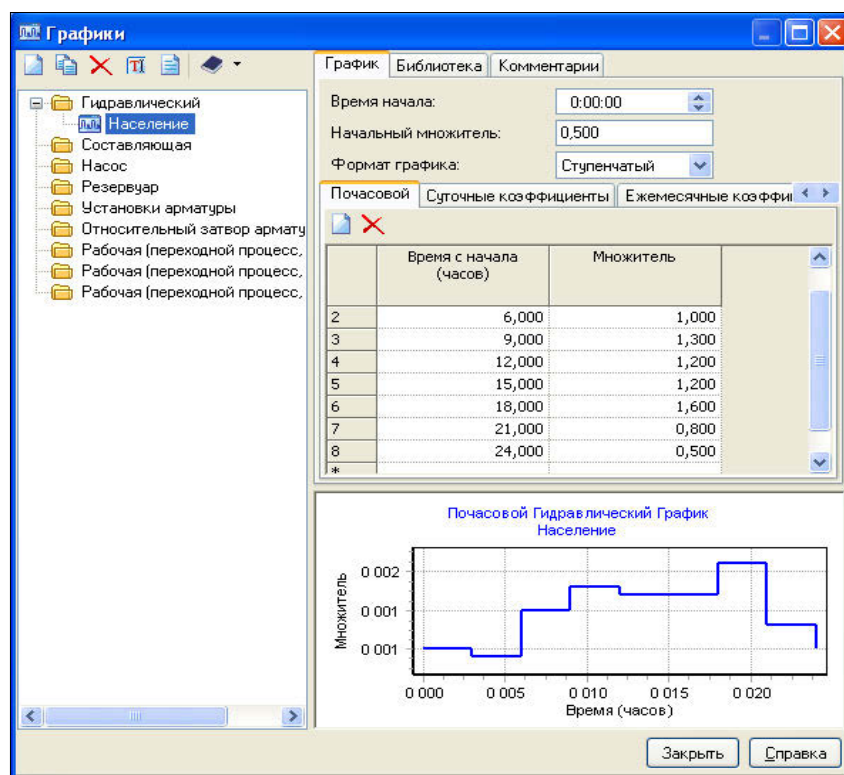


Рис. 3.2. График неравномерности потребления «Население»

Задайте время начала графика 00:00:00, начальный множитель 0,4. Укажите, что график должен быть ступенчатым. Введите значения коэффициентов неравномерности (множитель) согласно табл. 3.2. Введенные значения автоматически отображаются в виде графика (рис. 3.3).

Закройте окно *Графики*.

Таблица 3.2

Коэффициенты (множители) неравномерности  
потребления *Предприятия*

Время с начала (часов)	Множитель
3	0,6
6	0,8
9	1,6
12	1,6
15	1,2
18	0,8
21	0,6
24	0,4

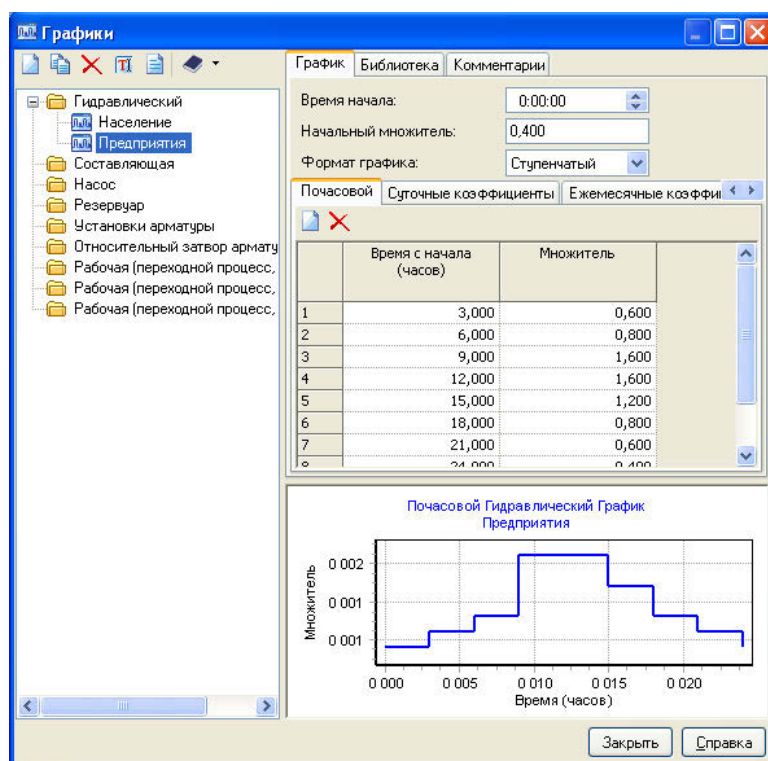



Рис. 3.3. График неравномерности потребления «Предприятия»

Двойным щелчком откройте окно свойств узла J-1. Нажмите на кнопку  в поле *Узловой отбор* для открытия окна *Потребления*. Обратите внимание, что по умолчанию задана фиксированная величина отбора. Измените значение отбора в этом узле на 23 л/мин и в графе *График (потребление)* задайте график *Население*. Аналогично введите базовый отбор 15 л/мин по графику *Предприятия* (рис. 3.4).

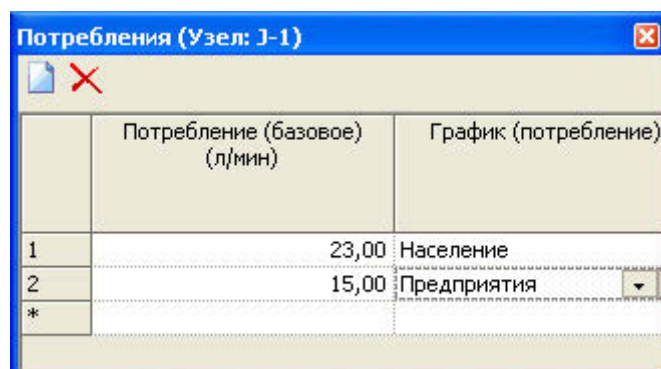


Рис. 3.4. Окно для ввода значения узлового отбора

При выполнении расчетов эти отборы будут суммироваться.

Аналогичным образом задайте отборы в узлах J-2, J-3, J-4, J-5 и J-6, представленные в табл. 3.3.

Таблица 3.3

#### Графики и базовое потребление в узлах

Узел	Население (л/мин)	Предприятия (л/мин)
J-2	23	8
J-3	23	11
J-4	23	15
J-5	350	–
J-6	280	76

Предлагаем вам самостоятельно создать еще один график потребления, имитирующий отбор воды на пожаротушение в узле J-6 с 18 до 21 часа включительно в количестве 2000 л/мин.

### 3.2. Гидравлический расчет сети в режиме EPS

Сначала необходимо установить параметры расчета. Для этого воспользуйтесь пунктом главного меню **Анализ – Опции расчета**.

Двойным щелчком по пункту *Базовые опции расчета (Устойчивое состояние / Программа решений EPS)* откройте окно *Свойства – Опции расчета*. В нем установите *Тип временного анализа – EPS*, продолжительность расчета – 24 часа и гидравлический такт – 1 час (рис. 3.5).

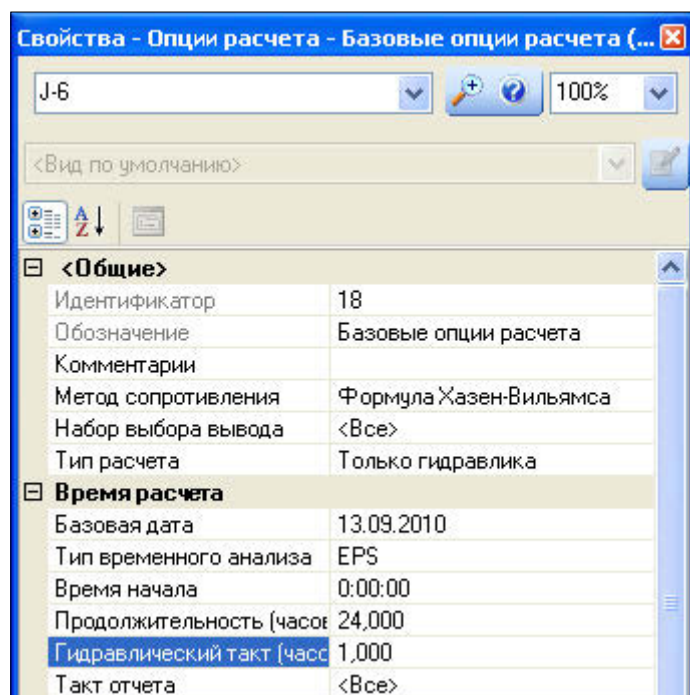


Рис. 3.5. Опции расчета EPS

Закройте окно свойств и запустите расчет.

Обратите внимание на сообщения программы, которые выводятся в окне *Уведомления пользователя* (рис. 3.6). Если окно уведомлений отсутствует, нажмите кнопку

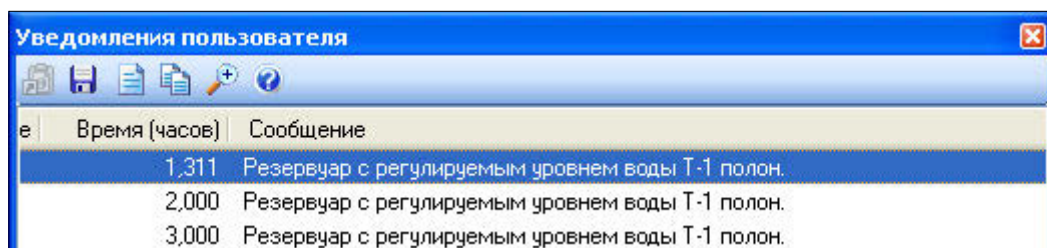


Рис. 3.6. Окно уведомлений

Сохраните проект после завершения расчета.

Изменения параметров сети во времени лучше всего видны на графиках. Например, чтобы вывести на экран график изменения напора в узле J-4, выполните следующие действия.

Щелчком правой кнопки по изображению узла на схеме откройте меню и выберите в нем пункт *График* (рис. 3.7).

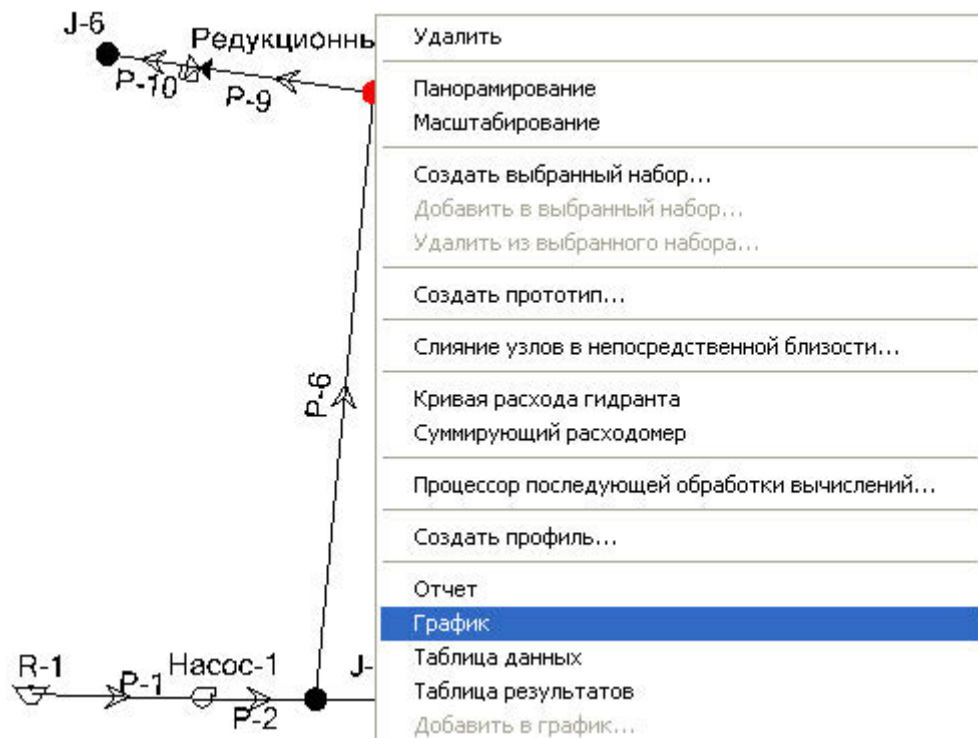


Рис. 3.7. Контекстное меню

В окне *Опции серии графиков*, которое появится на экране, укажите, что нужно построить график изменения напора (рис. 3.8). Сравните построенный график с нашим примером (рис. 3.9)

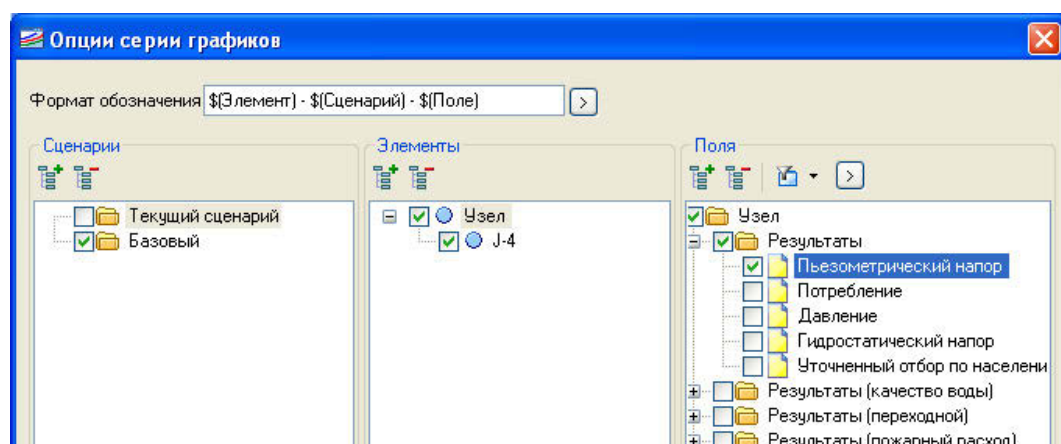


Рис. 3.8. Указание типа графика

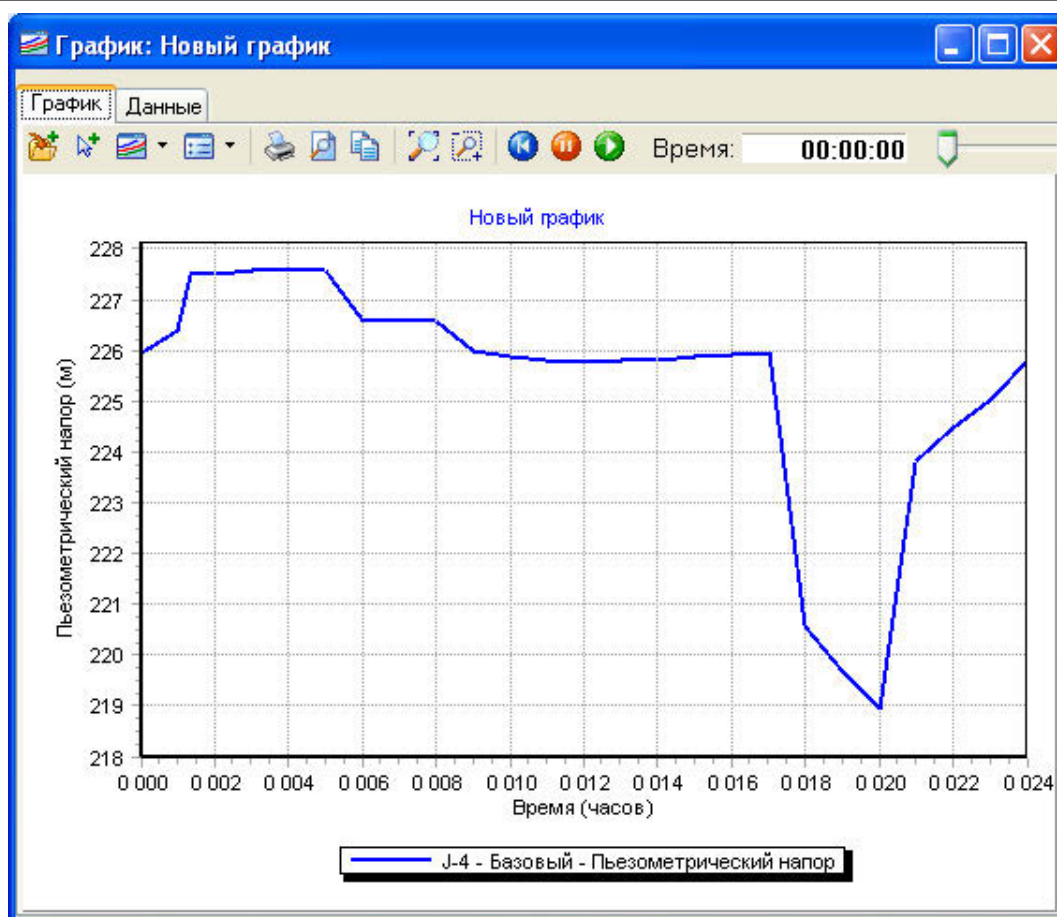


Рис. 3.9. График изменения напора в узле J-4

### 3.3. Сценарии и альтернативы

Одним из множества инструментов для работы с проектами в программе WaterGEMS является *Менеджер сценариев*. Это средство позволяет пользователю в рамках одного проекта получать ответы на различные вопросы типа «Что получится, если...?».

Сценарий – это некоторый набор так называемых альтернатив. В свою очередь, альтернатива – это набор конкретных значений параметров модели.

Сценарии и альтернативы основаны на отношениях между родительскими и дочерними вариантами расчета. Иными словами, дочерний сценарий или альтернатива наследуют параметры родительского сценария или альтернативы.

Ранее вы выполнили два вида гидравлического расчета распределительной сети водоснабжения – в установившемся режиме и при



изменении узловых отборов во времени. В этом параграфе будут рассмотрены расчеты сети при изменении отборов и диаметров труб.

### 3.3.1. Создание новой альтернативы потребления

Прежде всего, необходимо задать вид альтернативы. В WaterGEMS существует 12 видов альтернатив. Каждая альтернатива включает данные, относящиеся к определенной части модели (рис. 3.10).

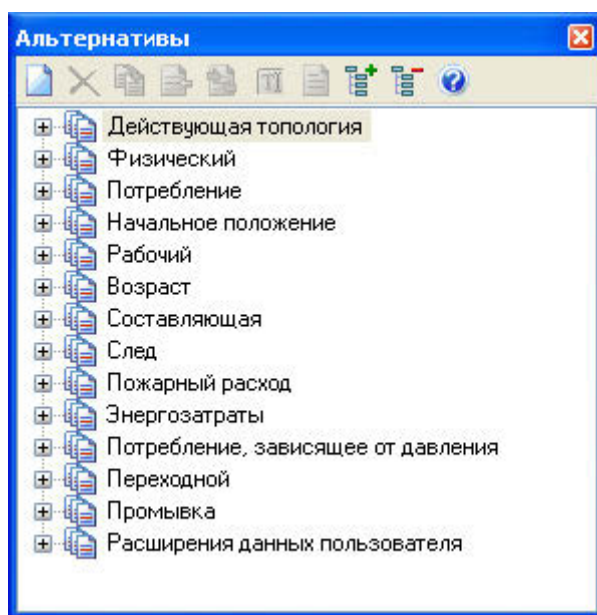


Рис. 3.10. Виды альтернатив WaterGEMS

Рассмотрим пример альтернативы. Допустим, что базовый расход воды на пожаротушение в узле J-6 составляет не 2000, а 4000 л/мин. Как при этом изменится работа сети? Для ответа на этот вопрос выполните следующие действия.

Активизируйте пункт главного меню **Анализ – Альтернативы**. Двойным щелчком раскройте содержимое альтернативы *Потребление*. Пока имеется только одна альтернатива (рис. 3.11), параметры которой соответствуют существующей схеме.

Переименуйте базовую альтернативу, назвав ее, например, *Среднее с пожаром 2000 л/мин*.

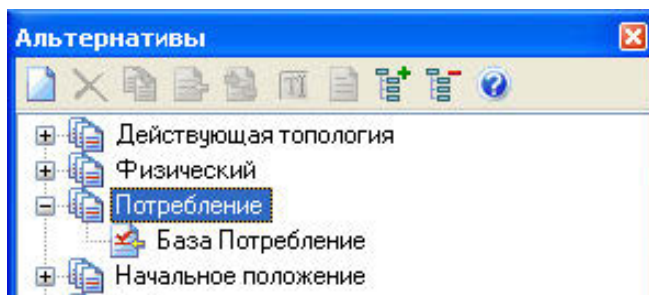


Рис. 3.11. Существующая альтернатива потребления

Двойным щелчком по наименованию данной альтернативы откройте окно менеджера альтернатив потребления и познакомьтесь с его содержимым (рис. 3.12).

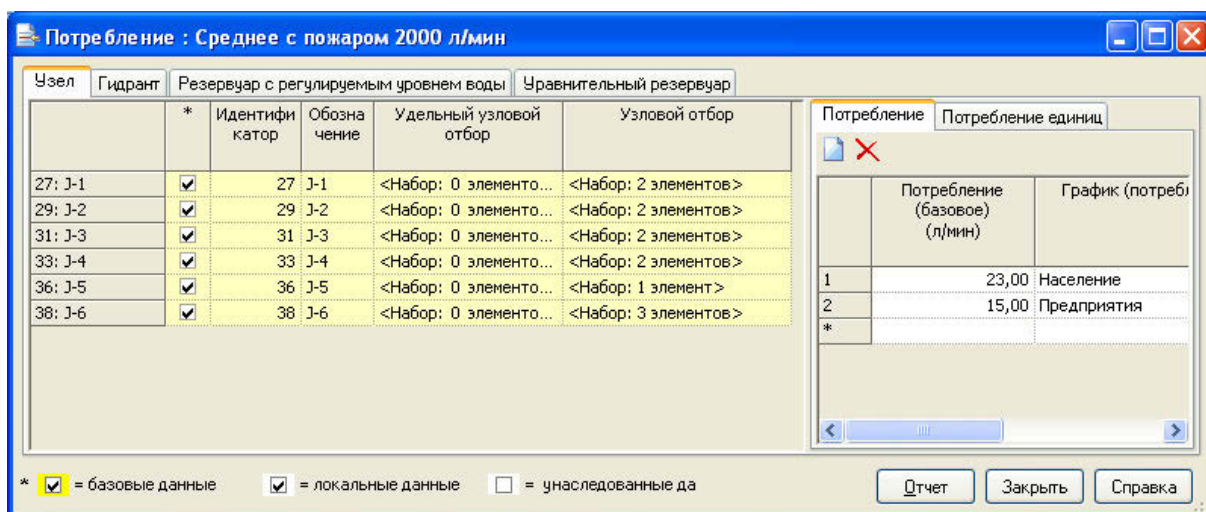


Рис. 3.12. Менеджер альтернатив потребления

Временно закройте это окно и создайте дочернюю альтернативу. Ее отличие от базовой будет заключаться лишь в увеличенном до 4000 л/мин отборе на пожаротушение. Для этого щелчком правой клавиши по наименованию родительской альтернативы откройте меню и создайте альтернативу для потомка (т. е. дочернюю), например *Пожар 4000* (рис. 3.13).

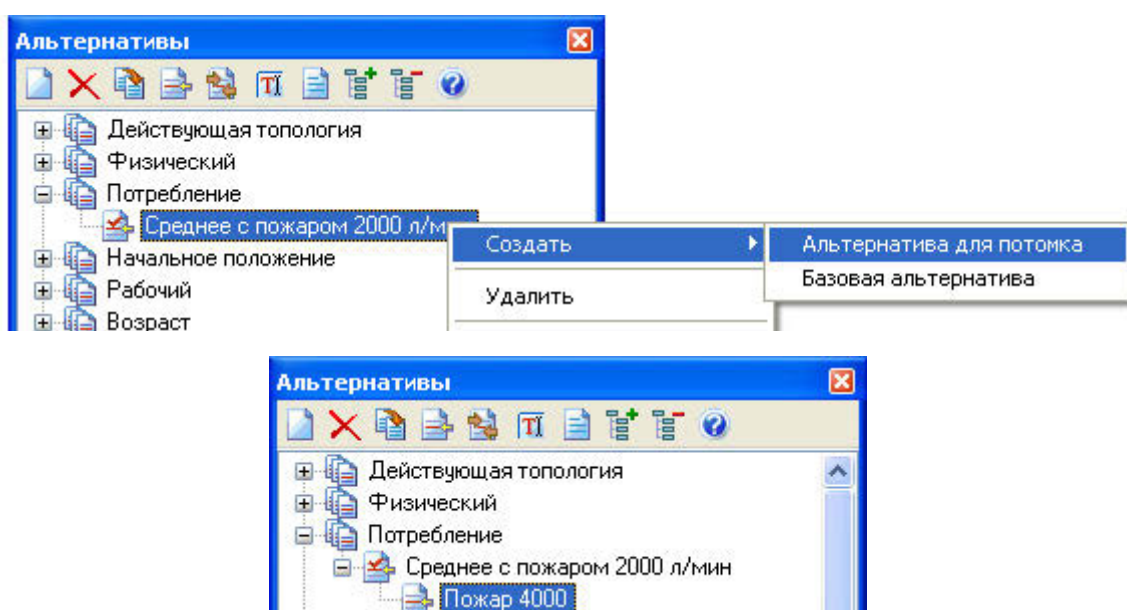


Рис. 3.13. Создание дочерней альтернативы



Двойным щелчком по наименованию новой альтернативы откройте вновь окно менеджера альтернатив. Обратите внимание: все данные унаследованы от родительской альтернативы (рис. 3.14).

Установите курсор на строку с наименованием узла J-6 и введите новое значение базового отбора при пожаре 4000 л/мин. Если теперь перенести курсор на другой узел, то строка J-6 будет отмечена как имеющая локальные данные.

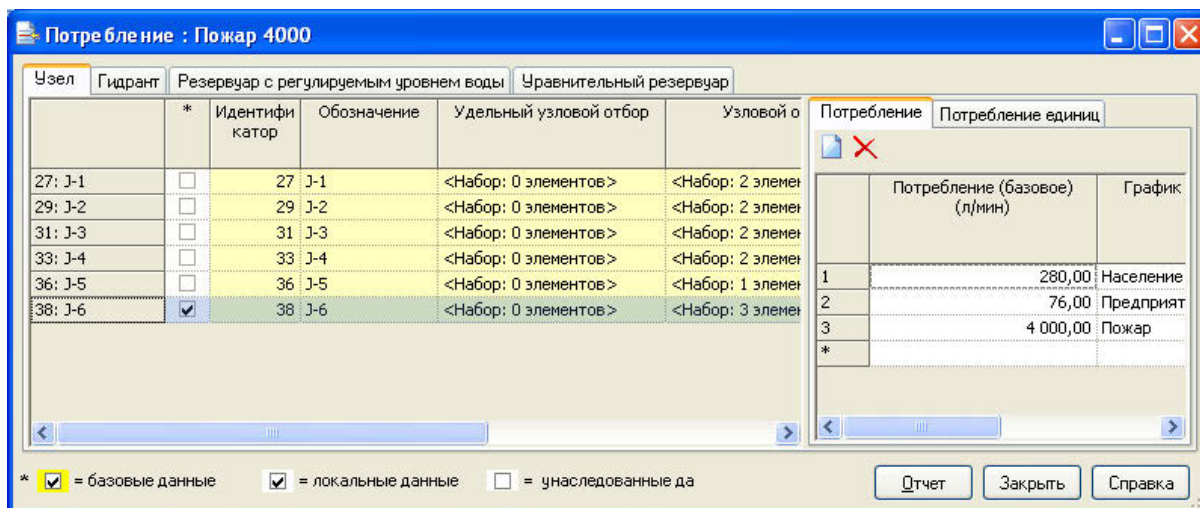


Рис. 3.14. Дочерняя альтернатива

### 3.3.2. Создание и редактирование дочернего сценария

Альтернативы – это части сценария. Сценарий может содержать несколько альтернатив. Кроме того он содержит все сведения, необходимые для расчета по конкретной модели.

Точно так же, как существуют базовые, родительские и дочерние альтернативы, существуют и базовые, родительские и дочерние сценарии.

В отличие от альтернатив, которые наследуют значения родительских параметров, дочерние сценарии наследуют родительские альтернативы.

Для создания нового сценария активизируйте пункт главного меню **Анализ – Сценарии** (рис. 3.15).

Как видно, в проекте пока присутствует только базовый сценарий, основанный на базовых альтернативах.

Переименуйте базовый сценарий, назвав его, например, *Пожар: 2000 л/мин, 3 часа*.



Рис. 3.15. Окно сценариев

Создайте дочерний сценарий и включите в него созданную ранее новую альтернативу *Пожар 4000*. Для этого щелчком правой клавиши по имени сценария откройте меню и создайте новый сценарий.

Назовите его, например, *Пожар 4000 л/мин в J-6 (EPS)* (рис. 3.16).

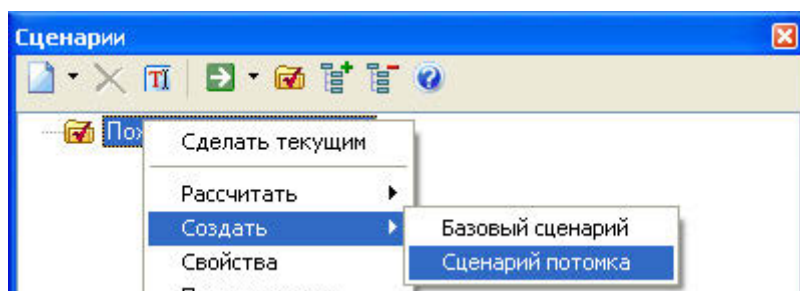


Рис. 3.16. Создание нового сценария

Двойным щелчком откройте окно его свойств и установите альтернативу потребления *Пожар 4000* (рис. 3.17).

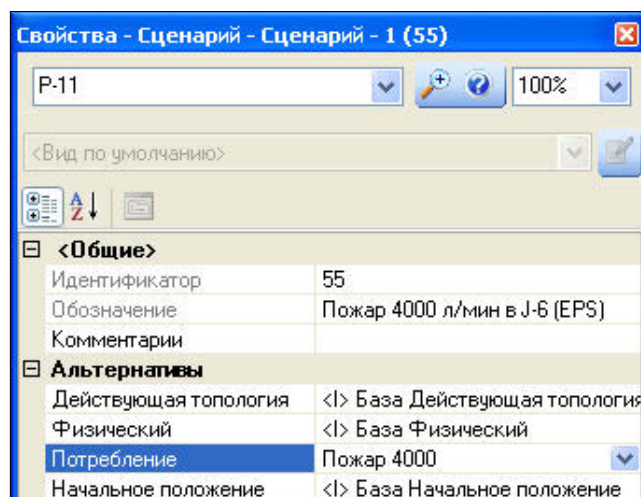


Рис. 3.17. Свойства сценария

Для одновременного расчета по нескольким сценариям, т. е. в пакетном режиме, в меню окна *Сценарии* выберите пункт *Пакетный запуск* и в одноименном окне укажите сценарии, которые нужно рас-

считать (рис. 3.18). Нажмите кнопку *Пакет* и подтвердите расчет выбранных сценариев.

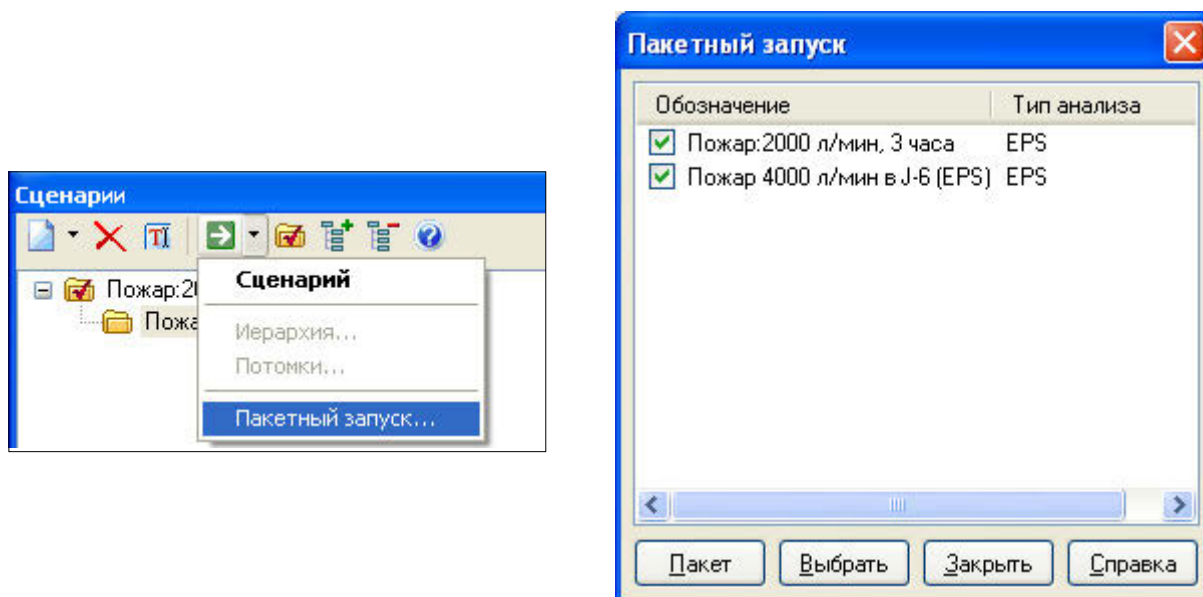


Рис. 3.18. Пакетный запуск сценариев

Для получения доступа к результатам расчета по какому-либо сценарию его необходимо объявить текущим (рис. 3.19).

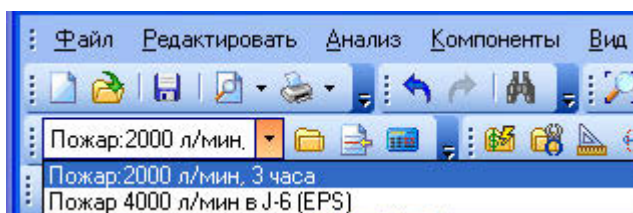


Рис. 3.19. Выбор текущего сценария

### 3.3.4. Физическая альтернатива

С целью сравнения сценариев можно воспользоваться графиками или таблицами, содержащими результаты расчетов. В них будут представлены, например, значения давлений в узлах, скоростей в отдельных трубопроводах сети. Проанализировав их величины, вы можете создать новые альтернативы для решения обнаруженных проблем.

Например, график изменения скорости в трубе P-9 (P-10) для сценария *Пожар 4000 л/мин в J-6 (EPS)* показывает, что ее значения могут превышать 4 м/с (рис. 3.20). Такие скорости в сетях водоснабжения не допускаются из-за резкого увеличения потерь энергии.

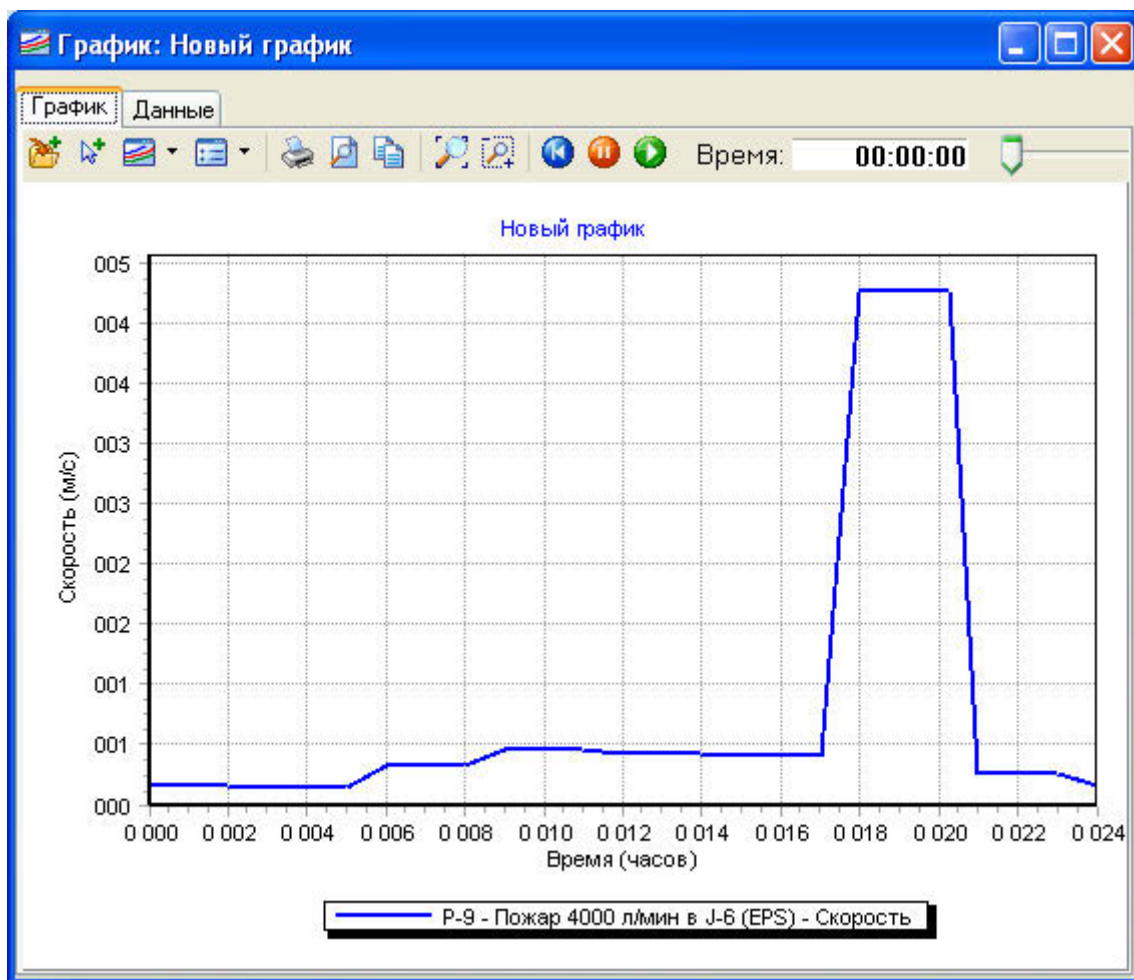


Рис. 3.20. График изменения скорости в трубе P-9

С целью снижения скорости нужно увеличить диаметры труб P-9 и P-10, например, до 200 мм.

Такие параметры трубопроводов, как диаметр, длина, материал, в WaterGEMS называются физическими и включены в соответствующую альтернативу.

Для выполнения расчетов с измененными диаметрами труб P-9 и P-10 создадим новый сценарий.

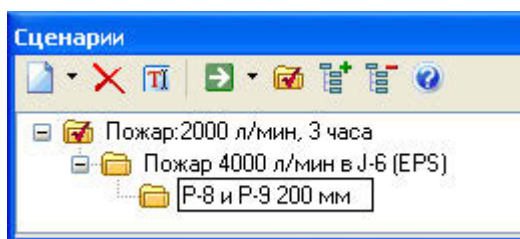


Рис. 3.21. Новый сценарий

Активизируйте пункт главного меню **Анализ – Сценарии**. В списке сценариев установите курсор на пункт **Пожар 4000 л/мин в J-6 (EPS)** и создайте новый дочерний сценарий с именем **P-9 и P-10 200 мм** (рис. 3.21).



Активизируйте пункт главного меню **Анализ – Альтернативы** и раскройте список физических альтернатив. Создайте дочернюю альтернативу *P-9 и P-10 200 мм* для *База Физический* (рис. 3.22).

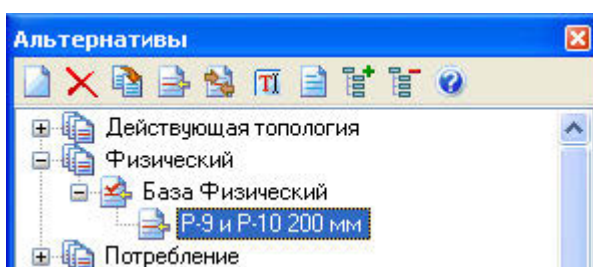


Рис. 3.22. Новая физическая альтернатива

Двойным щелчком по имени этой альтернативы откройте окно физических альтернатив и введите новые значения диаметров труб P-9 и P-10 (рис. 3.23). Закройте окно менеджера альтернатив.

Физический : P-9 и P-10 200 мм

Труба	Узел	Гидрант	Резервуар с регулируемым уровнем воды	Резервуар	Насос	Группа регулируемых
		е по формуле Дарси-Вейсбаха (м)	С по формуле Хазен-Вильямса	п по формуле Мэннинга	Диаметр (мм)	Материал
26: P-1		0,0003	130,0	0,012	1 000,0	Чугун
28: P-2		0,0003	130,0	0,012	150,0	Чугун
30: P-3		0,0003	130,0	0,012	150,0	Чугун
32: P-4		0,0003	130,0	0,012	150,0	Чугун
34: P-5		0,0003	130,0	0,012	150,0	Чугун
35: P-6		0,0003	130,0	0,012	150,0	Чугун
37: P-7		0,0003	130,0	0,012	150,0	Чугун
42: P-9		0,0003	130,0	0,012	200,0	Чугун
43: P-10		0,0003	130,0	0,012	200,0	Чугун
45: P-11		0,0003	130,0	0,012	150,0	Чугун

\* ☒ = базовые данные    ☒ = локальные данные    ☐ = унаследован

Отчет    Закрыть    Справка

Рис. 3.23. Параметры физических альтернатив

Откройте менеджер сценариев и двойным щелчком по имени сценария *P-9 и P-10 200 мм* откройте окно его свойств. Задайте созданную физическую альтернативу в качестве рабочей для данного сценария (рис. 3.24). Сохраните проект и выполните расчет по новому сценарию.

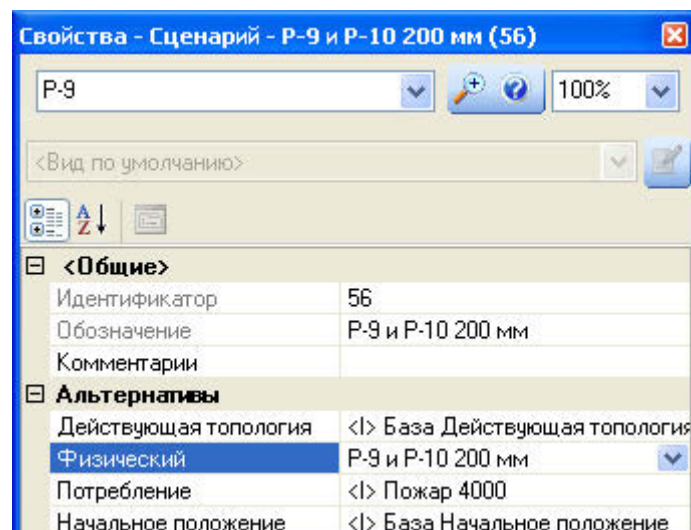


Рис. 3.24. Свойства нового сценария

После завершения расчета предлагаем вам самостоятельно тем или иным способом убедиться, что максимальная скорость в трубах уменьшилась до 2,5 м/с.

---

## 4. Импортирование данных

При создании модели сети очень часто возникает необходимость импортирования тех или иных данных из различных файлов. Все современные программы для моделирования сетей предоставляют в распоряжение пользователей специальные средства (мастера), позволяющие максимально автоматизировать этот процесс. Здесь мы остановимся на некоторых общих принципах импорта, которые следует иметь в виду при выполнении этих операций.

Файлы-источники данных могут быть самыми разными: текстовые файлы, созданные с помощью тех или иных редакторов; электронные таблицы (Excel, Lotus); файлы систем управления базами данных (СУБД), таких как Access, dBase, Oracle и др.

Графические данные (например, схема сети) могут храниться в форматах систем автоматизированного проектирования (AutoCAD, MicroStation).

Возможности СУБД и графических средств САПР объединяются в геоинформационных системах (ГИС), все более широко используемых для сбора и хранения самых разнообразных сведений о работе сетей и их параметрах.

### 4.1. Принципы импортирования данных различных типов

#### 4.1.1. Импорт текстовых данных, электронных таблиц и баз данных

Прежде всего, заметим, что автоматический импорт данных из файлов документов, созданных с помощью современных текстовых редакторов (типа MS Word и т. п.) не осуществляется. В то же время вручную перенести данные, например, из таблицы, созданной средствами редактора, часто возможно путем стандартных операций копирования.

Автоматический импорт возможен из текстовых файлов относительно простой структуры, использующих кодовую таблицу ASCII. Обычно это файлы типа *txt*, *csv* (значения с разделителями в виде запятых или символа табуляции) или *html*.

Данные в таком файле должны быть представлены в виде таблицы, первая строка которой при импорте обычно воспринима-

ется как заголовок, содержащий наименования колонок. Каждая колонка должна содержать значения какого-либо одного атрибута, характеризующего элемент модели. Допустим, одна колонка может содержать наименование элемента, например узла сети, другая – его вертикальную координату, третья и четвертая – горизонтальные координаты (рис. 4.1).

Количество атрибутов, представленных в одной таблице, может быть любым. Обычно в процессе импорта пользователям предоставляется возможность выбрать только необходимые атрибуты. Часто программы для моделирования позволяют осуществлять импорт одновременно из нескольких файлов-источников одного типа.

Имя узла	Высота	X (m)	Y (m)
J1	215,701	1004566,8	742073,93
J2	212,111	1004599,7	742141,86
J3	212,101	1004634,7	742228,68
J4	210,701	1004660	742303,81
J5	202,051	1004704,4	742388,54
J6	191,501	1004754,8	742433,11
J7	189,401	1004806	742479,08
J8	185,101	1004881	742545,64
J9	193,901	1005110,9	742653,99
J10	197,051	1005340	742754,5
J11	197,961	1005392,1	742770,9
J12	197,201	1005507,2	742807,95
J13	201,101	1005639,5	742846,35
J14	203,941	1005726,5	742869,24
J15	208,101	1005893,9	742914,83
J16	210,101	1005952,6	742929,55
J17	235,941	1006086,4	742965,95
J18	242,151	1006193	742996,47
J19	244,351	1006329,9	743035,08
J20	247,921	1006452,4	743069,84
J21	253,261	1006559,9	743100,47
J22	253,701	1006612,7	743115,55
J23	251,441	1006664,6	743130,46
J24	248,921	1006804,8	743170,26
J25	250,171	1006950,7	743208,32

Рис. 4.1. Пример текстовой таблицы

Файлы электронных таблиц (например, типа *xls*) и баз данных (типа *dbf*, *mdb*) перед импортом обычно не требуют предварительных преобразований. Тем не менее, необходимо иметь в виду, что программы для моделирования сетей хранят данные и результаты расчетов в файлах, представляющих собой совокупность взаимосвязанных таблиц (баз данных). В каждой таблице хранятся данные,



относящиеся к какому-нибудь конкретному типу элементов сети: узлам, трубам, резервуарам и т. д.

С другой стороны, файлы-источники данных могут иметь совершенно произвольную структуру. Например, в одной электронной таблице могут содержаться данные о высоте расположения всех указанных выше элементов. В этом случае такую таблицу необходимо предварительно разделить на несколько более мелких таблиц (рис. 4.2).

Эти таблицы можно разместить в отдельных текстовых файлах, на различных листах одной электронной таблицы или в различных таблицах одной базы данных

Каждая таблица должна обязательно содержать так называемый ключевой атрибут, который позволяет однозначно идентифицировать тот или иной элемент модели. Например, им может быть колонка, содержащая обозначения элементов. В таблице не должно быть двух и более элементов с одинаковыми значениями ключевого атрибута.

Исходная таблица			Таблица «Узлы»	
Тип элемента	Обозначение	Высота, м	Обозначение	Высота, м
Узел	J-22	123,5	J-22	123,5
Насос	PMP-1	125,1	J-43	131,2
Узел	J-43	131,2		
Насос	PMP-2	125,8		
Задвижка	V-5	128,4		
Задвижка	V-3	127,3		
			Таблица «Насосы»	
			Обозначение	Высота, м
			PMP-1	125,1
			PMP-2	125,8
			Таблица «Задвижки»	
			Обозначение	Высота, м
			V-5	128,4
			V-3	127,3

Рис. 4.2. Пример разделения таблицы

Необходимо убедиться, что формат данных в файле-источнике соответствует требованиям программы моделирования. Прежде всего, это касается символа-разделителя целой и дробной части

---

десятичных чисел (запятая или точка), а так же формата представления календарных дат.

Конечно, следует при необходимости преобразовать размерности вводимых величин к требуемому виду.

При импорте обязательно потребуется установить соответствие между атрибутами файла-источника и определенной таблицы программы моделирования (рис. 4.3). Поэтому необходимо точно знать, как именно называются атрибуты элементов модели в программе. Это особенно важно при использовании нелокализованных программ. Например, русскому термину «узел» могут соответствовать английские «junction», «node» или «point». Конечно, точные наименования атрибутов, используемые в программе, необходимо выяснить заранее по ее документации.

Таблица-источник			Таблица-приемник		
Обозначение	Диаметр	Длина	Label	Diameter	Length
P-2	100	153,5	P-2	100	153,5
P-17	150	25,1	P-17	150	25,1
P-43	100	160,2	P-43	100	160,2
P-21	125	125,4	P-21	125	125,4
P-5	125	128,4	P-5	125	128,4
P-3	150	227,5	P-3	150	227,5

Рис. 4.3. Соответствие между атрибутами таблиц

#### 4.1.2. Графические данные

Графические файлы, содержащие схемы сетей, создаются обычно с помощью систем автоматизированного проектирования. С точки зрения решения задачи моделирования они малоинформативны, поскольку не могут содержать всех необходимых для этого данных. Тем не менее, импортрование схемы позволяет существенно облегчить процедуру создания модели сложной сети.

То, насколько успешно будет осуществлен импорт, а следовательно, и каков будет объем работы по доработке схемы, во многом зависит от качества исходных файлов. Следует иметь в виду, что часто схемы сетей с помощью той или иной САПР создаются (коррек-

---

тируются) в течение продолжительного времени (даже нескольких лет) различными людьми, обладающими различной квалификацией. При этом часто в момент начала этих работ даже не принимается во внимание то, что данные могут когда-либо потребоваться для выполнения гидравлических или иных расчетов.

Файлы, создаваемые в среде той или иной САПР, типа *dwg*, *dgn* или *dxf* являются векторными. Это означает, что изображения создаются с помощью так называемых графических примитивов, т. е. некоторых простейших элементов. Ими являются, например, точки, прямые линии, окружности и т. п.

Обычно импортируются не все примитивы. Конкретный перечень примитивов, которые распознаются той или иной программой моделирования, указывается в ее сопроводительной документации. Однако в их число, безусловно, входят линии (полилинии), с помощью которых на чертежах изображаются трубопроводы.

Конечно, в общем случае на чертежах могут присутствовать не только трубопроводы, но и другие объекты, не имеющие отношения к сети, например: дороги, какие-либо строения и т. п. Если они изображены тоже с помощью линий, то при импорте программа не сможет отличить их от трубопроводов. Во избежание подобных недоразумений трубопроводы и другие элементы сетей следует размещать в отдельных слоях импортируемого проекта (файла).

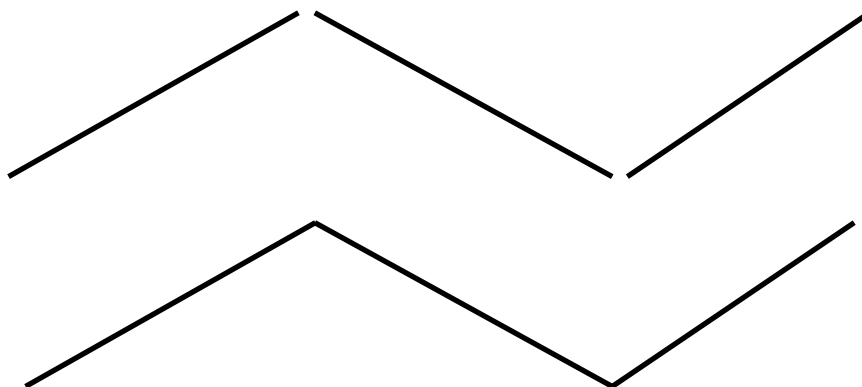
Как и при импорте текстовых файлов, программе необходимо указывать ключевой атрибут. Набор импортируемых атрибутов графических объектов ограничен. Например, для линии это ее тип (сплошная, пунктир и т. п.), толщина, цвет и т. п. Скорее всего, атрибута с уникальными для каждого элемента значениями в этом перечне не найдется.

Одним из возможных способов решения этой проблемы является создание программой импорта искусственного ключевого атрибута. Это может быть, например, наименование графического примитива и его номер: *polyline-1*, *polyline-2* и т. д.

Обычно пользователи, создавая схему сети средствами САПР, изображают трубопроводы отдельными или ломаными линиями (полилиниями). При импорте каждый отрезок ломаной линии воспринимается как отдельный трубопровод. Например, и первая

---

группа отрезков, и вторая полилиния, показанные на рис. 4.4, будут импортированы в виде трех отдельных отрезков. Их концы по умолчанию считаются узлами, т. е. в обоих случаях будут созданы шесть узлов.

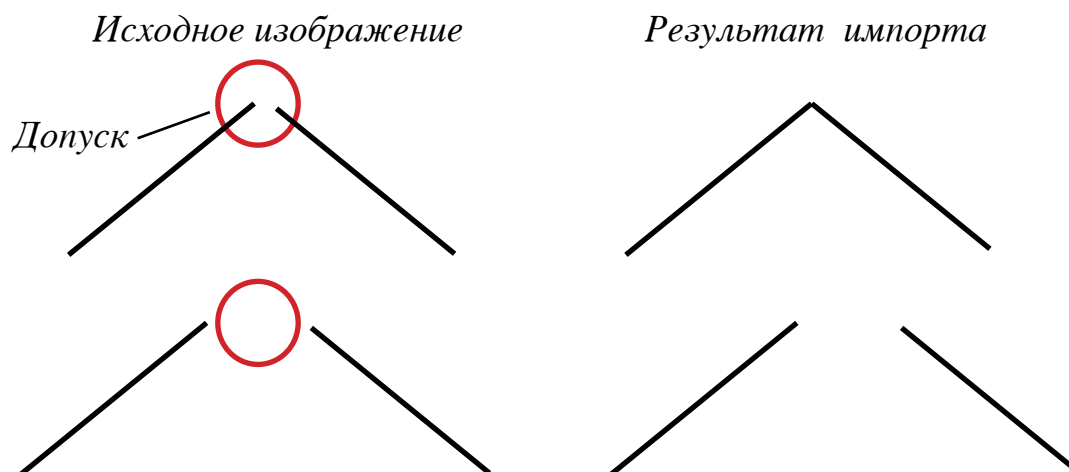


*Рис. 4.4. Варианты изображения трубопроводов*

При этом программе следует указать условие, при котором конечные точки соседних трубопроводов должны быть импортированы как один общий узел.

Очевидно, что таким условием является расстояние между узлами. Его называют допуском или толерантностью. На практике это выглядит, например, так: если расстояние между узлами в масштабе чертежа менее одного метра, то их следует объединить, в противном случае узлы не объединяются (рис. 4.5).

Заметим, что допуск, отличный от нуля, обычно нужно указывать и в том случае, если трубопровод изображен в виде ломаной линии.

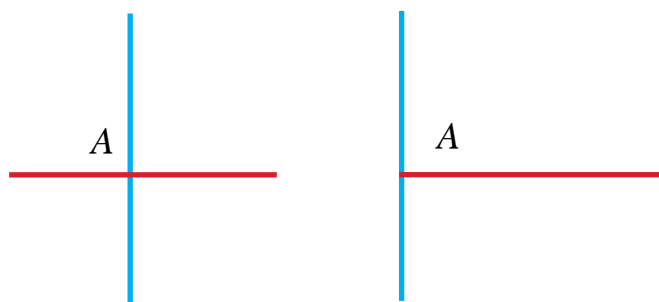


*Рис. 4.5. Объединение узлов при импорте*

---

Еще один вопрос, который приходится решать при импорте, связан с пересечениями отрезков.

На рис. 4.6 показаны в качестве примера варианты пересечения двух отрезков. Их общая, на первый взгляд, точка *A* не будет воспринята как узел, поскольку принадлежит разным графическим объектам. На самом деле точка пересечения вполне может оказаться узлом, который просто не указан на чертеже.



*Рис. 4.6. Пересечение отрезков*

Современные программы для моделирования сетей имеют в своем арсенале средства анализа таких ситуаций. В частности, после импорта схемы они позволяют находить пересекающиеся отрезки, совпадающие (дублирующие) трубопроводы и т. п. Конечно, при необходимости уже сам пользователь должен внести изменения в схему.

### *4.1.3. Файлы ГИС*

Существует множество определений ГИС. Самое простое: ГИС – это пространственно ориентированная база данных. На первый взгляд, так оно и есть: сердце любой ГИС – база данных, которая в отличие от обычных СУБД имеет географическую привязку. С помощью ГИС могут быть выполнены определенные пространственные операции, которые иначе были бы очень сложны, продолжительны или непрактичны с какой-либо другой точки зрения.

Гораздо шире определение, данное специалистами Института исследования систем окружающей среды (ESRI) в руководстве пользователя системы ARC/INFO: географическая информационная система – это организованный набор аппаратных и программных средств, географических данных и персонала, предназначенный для эффективного получения, хранения, обновления, обработки, анализа

---

и получения изображения всех видов географически привязанной информации. Как видно из этого определения, разработчиками ARC/INFO особо подчеркивается уникальность ГИС как мощного инструмента для пространственного анализа.

В геоинформационных системах применяются как векторные, так и растровые способы представления графических данных. Обычно пространственная информация в ГИС представлена в виде слоев. При этом каждый слой, наряду с графической информацией, содержит и атрибутивную, т. е. описательную.

Описательная часть, как правило, представлена в виде системы взаимосвязанных таблиц (реляционной базы данных) и «привязана» к графическим объектам на карте. Поэтому данные хранятся зачастую не в одном, а нескольких файлах: в одном файле хранятся графические данные, в другом – база данных, третий используется для связи графики с базой данных и т. п.

Поскольку каждая ГИС имеет в общем случае собственный формат данных, то возникают сложности при импорте (экспорте) данных из одной программы в другую. Из наиболее популярных векторных ГИС-форматов следует упомянуть шейп-файлы ArcView GIS (ESRI Inc.), покрытия ArcInfo (ESRI Inc.), базы геоданных ArcGIS (ESRI Inc.) и таблицы MapInfo (MapInfo Corp.).

При импорте данных наиболее предпочтительно использование шейп-файлов, которые поддерживаются практически всеми современными программами моделирования.

Шейп-файл (shapefile – файл форм) является внутренним форматом графических данных программы ArcView GIS (ArcGIS). Шейп-файл – это однородный набор пространственных объектов, которые могут иметь форму точки, мультиточки, полилинии или полигона. Каждый объект в шейп-файле представляет собой один географический объект в совокупности с его атрибутами. Геометрия объекта хранится как форма, содержащая набор векторных координат.

По сути дела, шейп-файл – это совокупность нескольких файлов, имеющих одинаковое имя, но разные расширения: главного файла (*shp*), индексных файлов (*shx*, *sbx* и т. п.) и таблицы атрибутивных данных (*sbn*, *dbf* и т. п.), которые могут содержать любые данные

---

об объектах, в том числе и необходимые для моделирования сети водоснабжения.


Таким образом, каждый шейп-файл – это один слой данных ГИС, содержащий сведения о каких-либо объектах. Ими могут быть, например: реки, дороги, высотные отметки, схема сети, потребители воды и т. п.

Общие принципы импорта шейп-файлов такие же, как и рассмотренных ранее файлов САД-систем. Однако в этом случае в распоряжении пользователя имеются не только графические атрибуты объектов, но и все те, которые созданы для них в среде ГИС.

Таким образом, представление исходных данных в виде шейп-файлов с целью их последующей обработки другими программами наиболее предпочтительно. Забегая вперед, заметим, что WaterGEMS имеет средства создания шейп-файлов, что в ряде случаев может быть очень полезно.

## 4.2. Импорт данных в среде WaterGEMS

Универсальным средством импорта данных из файлов различных форматов WaterGEMS является модуль ModelBuilder. Здесь процедура импорта будет продемонстрирована с использованием заранее подготовленных шейп-файлов.

После запуска программы WaterGEMS создайте новый проект. Активизируйте пункт главного меню **Инструменты – ModelBuilder** или нажмите кнопку .


В окне ModelBuilder нажмите кнопку  – *Создать* для запуска мастера, который позволяет осуществлять импорт шаг за шагом (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Стартовое окно ModelBuilder

Далее необходимо указать тип файлов, содержащих импортируемые данные. В данном случае это *Файлы данных ГИС* (рис. 4.8).

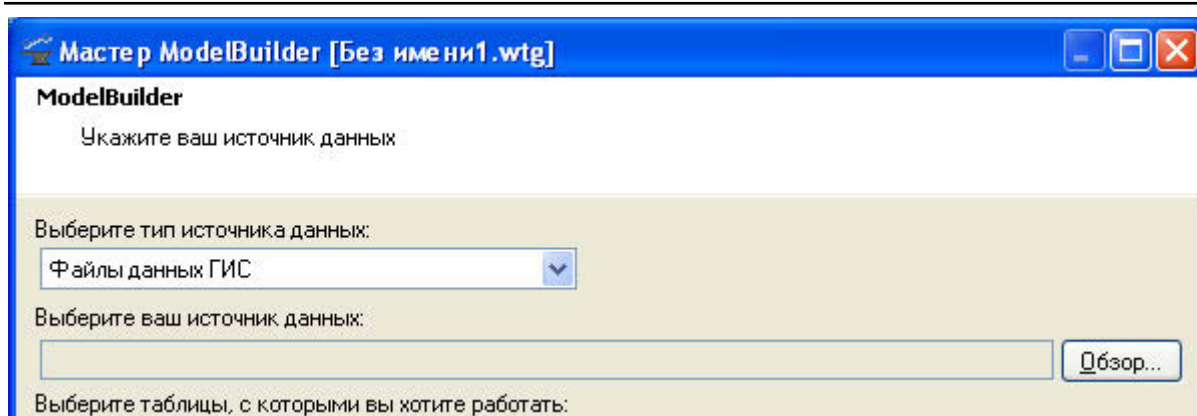


Рис. 4.8. Выбор типа импортируемых файлов

Нажмите кнопку *Обзор* и найдите требуемые файлы: *Tanks\_2.shp*, *Pipes\_2.shp*, *Junctions\_2.shp* (файлы разработаны фирмой Bentley). Они соответственно содержат данные о резервуарах, трубах и узлах сети.

Отметив пункт *Предварительный просмотр*, вы сможете познакомиться со структурой данных. Установите курсор, например, на *Tanks\_2 (точка)* (рис. 4.9).

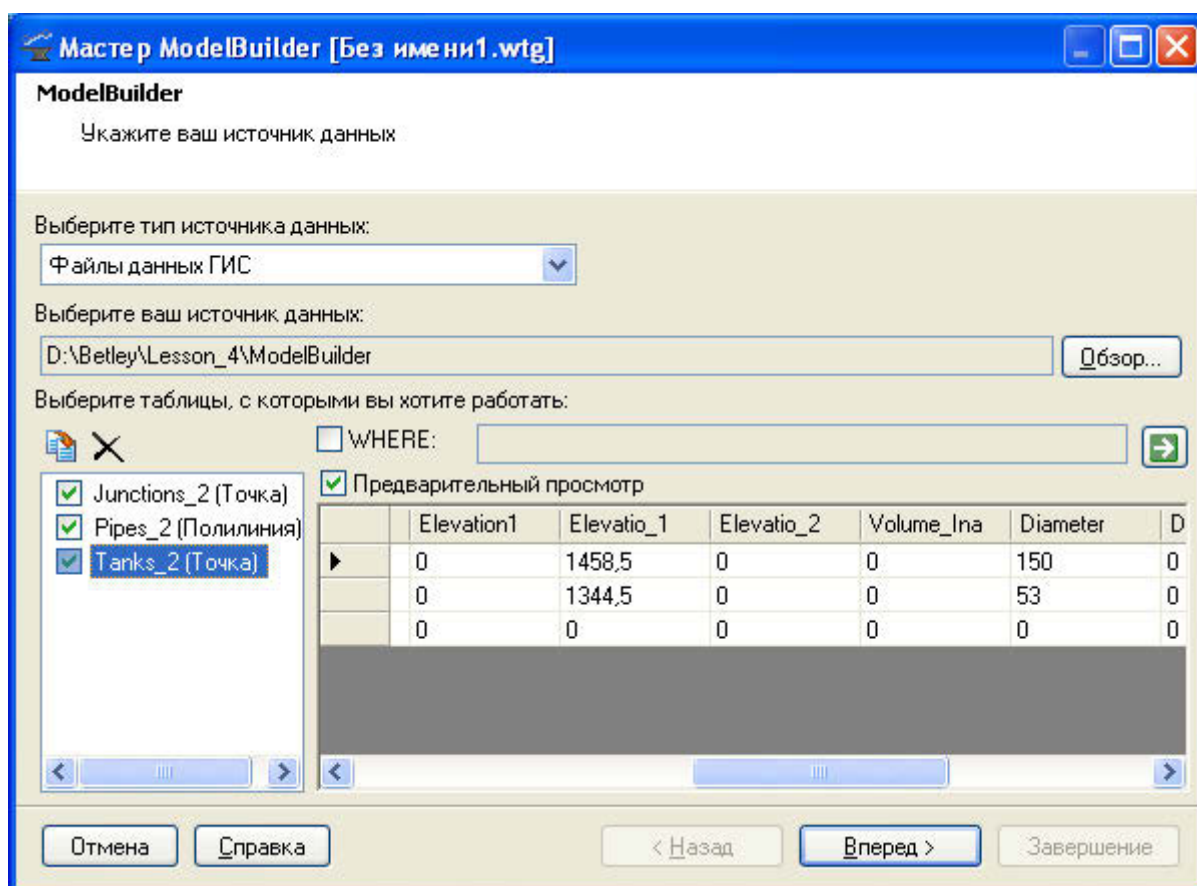


Рис. 4.9. Просмотр структуры данных



---

Обратите внимание, что большинство полей содержат нулевые данные. Нам потребуются данные из полей *Elevatio\_1* и *Diameter*. Они соответственно содержат значения уровней воды в резервуарах и их диаметры в футах.

Нажмите кнопку *Вперед* для выполнения следующего шага импорта – указания так называемых пространственных опций и опций соединения.

В открывшемся окне (рис. 4.10) укажите, что единицей измерения пространственных координат точек в источнике данных является *фут*. Убедитесь, что отмечен пункт *Создать узлы, если они не найдены на конечных точках трубы*.

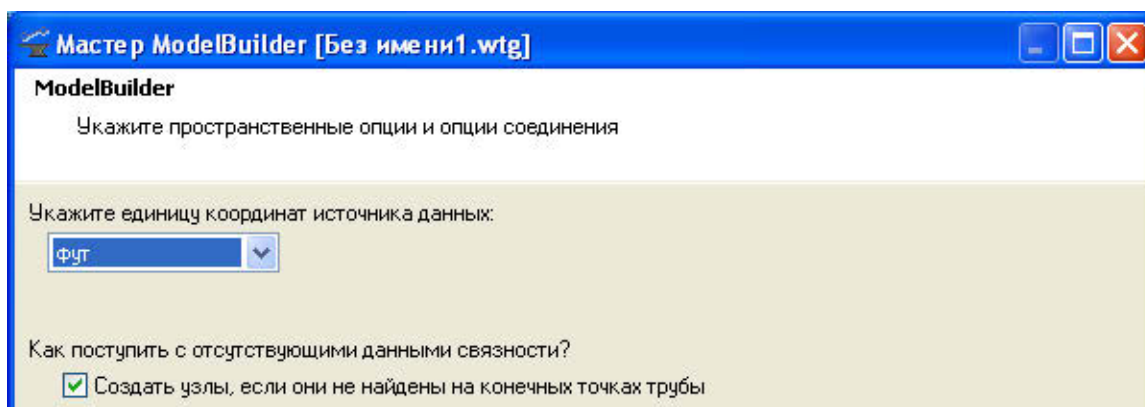


Рис. 4.10. Выбор единиц измерения координат

Нажмите кнопку *Вперед* для перехода к окну, где указываются параметры создания, удаления и обновления объектов (рис. 4.11).

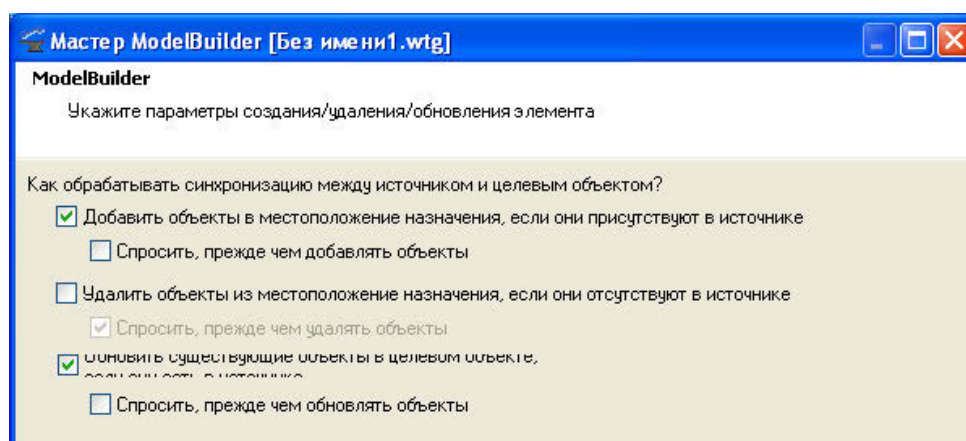


Рис. 4.11. Параметры создания элементов

Согласитесь с параметрами, предлагаемыми мастером по умолчанию, и перейдите к следующему шагу (рис. 4.12).

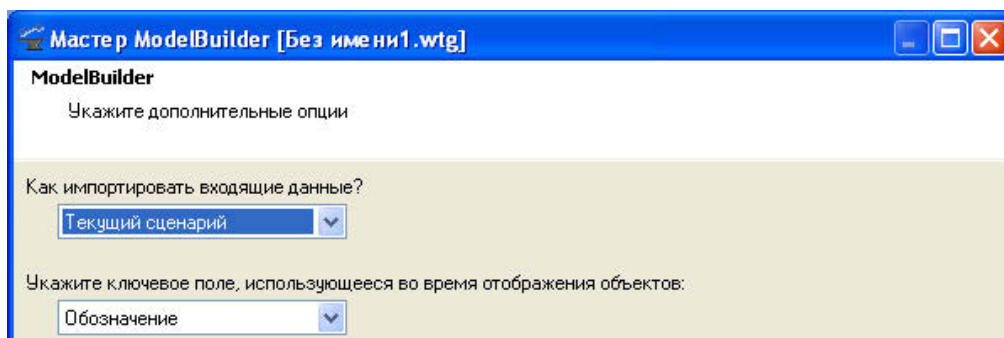


Рис. 4.12. Дополнительные опции

В данном окне тоже ничего не изменяйте, но обратите внимание, что в локализованной версии WaterGEMS ключевые атрибуты объектов называются *Обозначение*.

На очередном шаге вам предстоит установить соответствие между атрибутами импортируемых данных и моделью сети WaterGEMS (рис. 4.13).

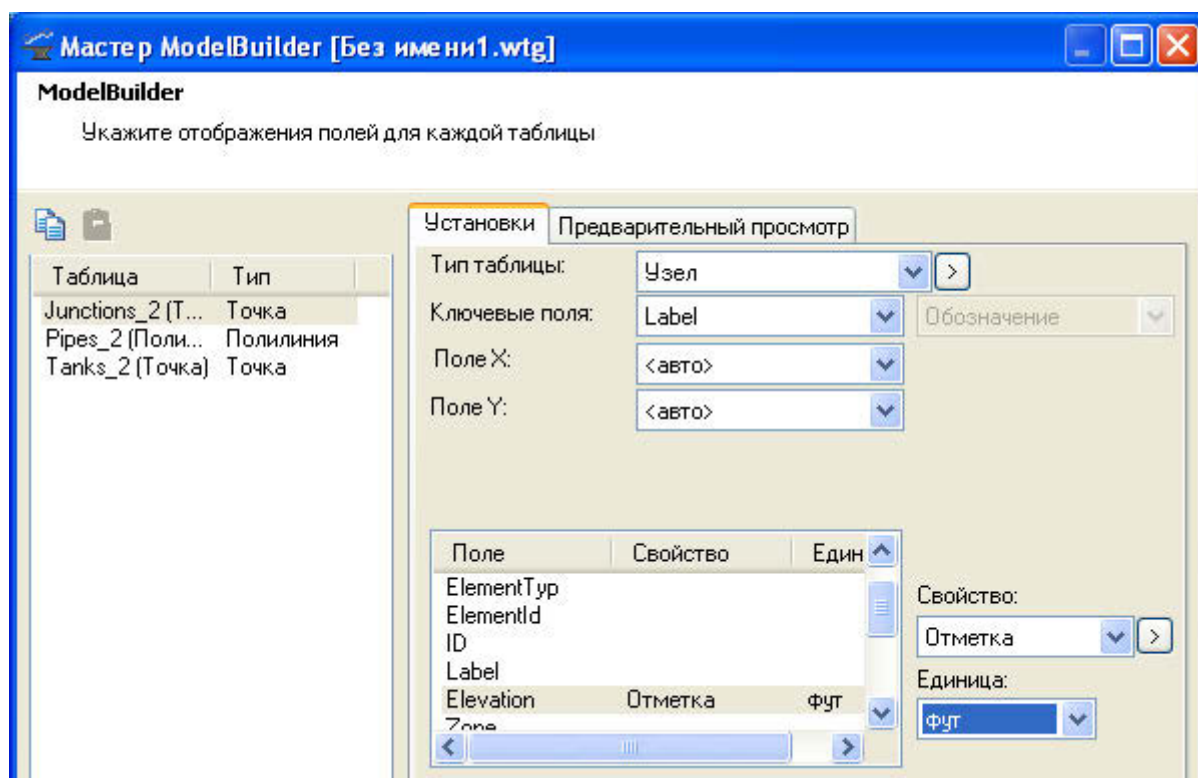


Рис. 4.13. Задание соответствия между атрибутами узлов

Установите курсор на имя таблицы узлов *Junctions\_2*. В ней ключевое поле имеет имя *Label*. Установите курсор на поле *Elevation* (высота) и в раскрывающемся списке *Свойство* найдите *Отметка*. В данной версии WaterGEMS именно таким термином обозначается

высота расположения узла. Укажите, что в файле-источнике высоты заданы в футах.

Установите курсор на имя таблицы труб *Pipes\_2* (рис. 4.14). В ней ключевое поле тоже имеет имя *Label*. В списке полей укажите, что полю *Diameter* соответствует *Диаметр*. Единица измерения – дюйм.

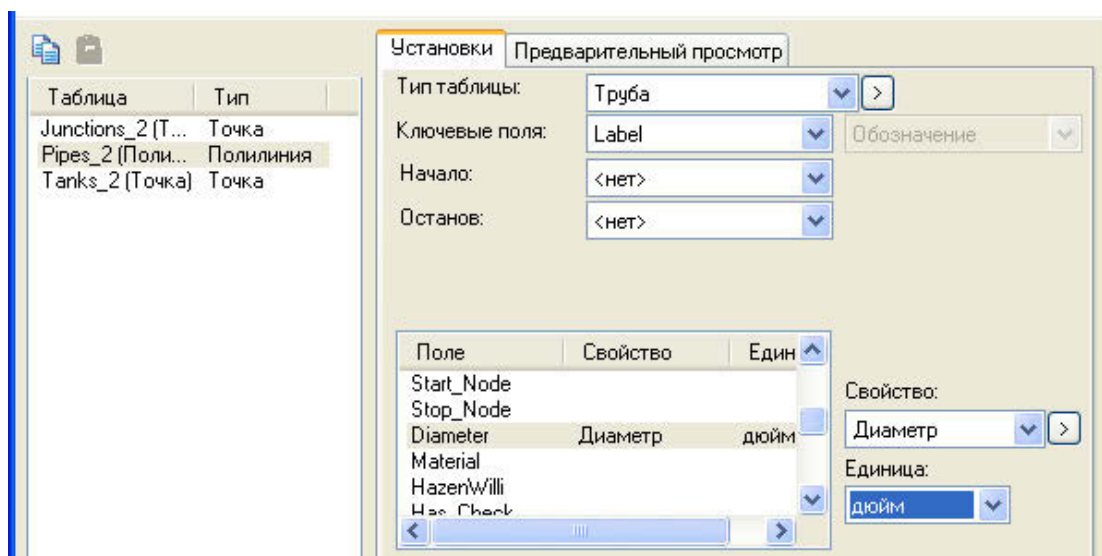


Рис. 4.14. Задание соответствия между атрибутами труб

Другой важный параметр труб – длина – будет в этом примере рассчитываться автоматически в соответствии с координатами их начальных и конечных точек.

Действуя по аналогии, установите параметры импорта файла резервуаров с регулируемыми уровнями *Tanks\_2* (рис. 4.15).

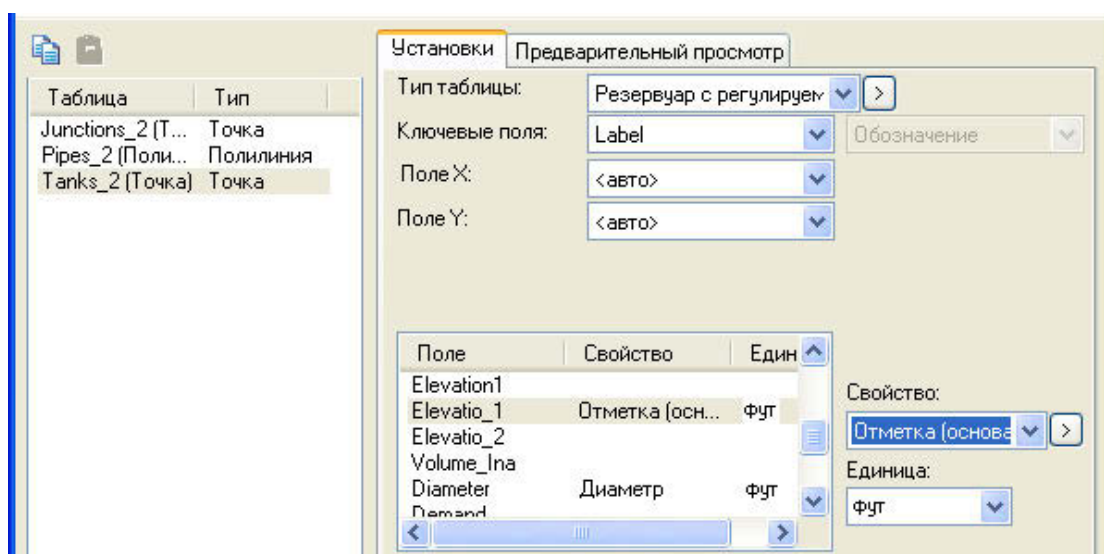


Рис. 4.15. Задание соответствия между атрибутами резервуаров

Перейдите к следующему шагу, на котором работа мастера завершается. Через некоторое время программа выведет сообщение о результатах импорта (рис. 4.16).

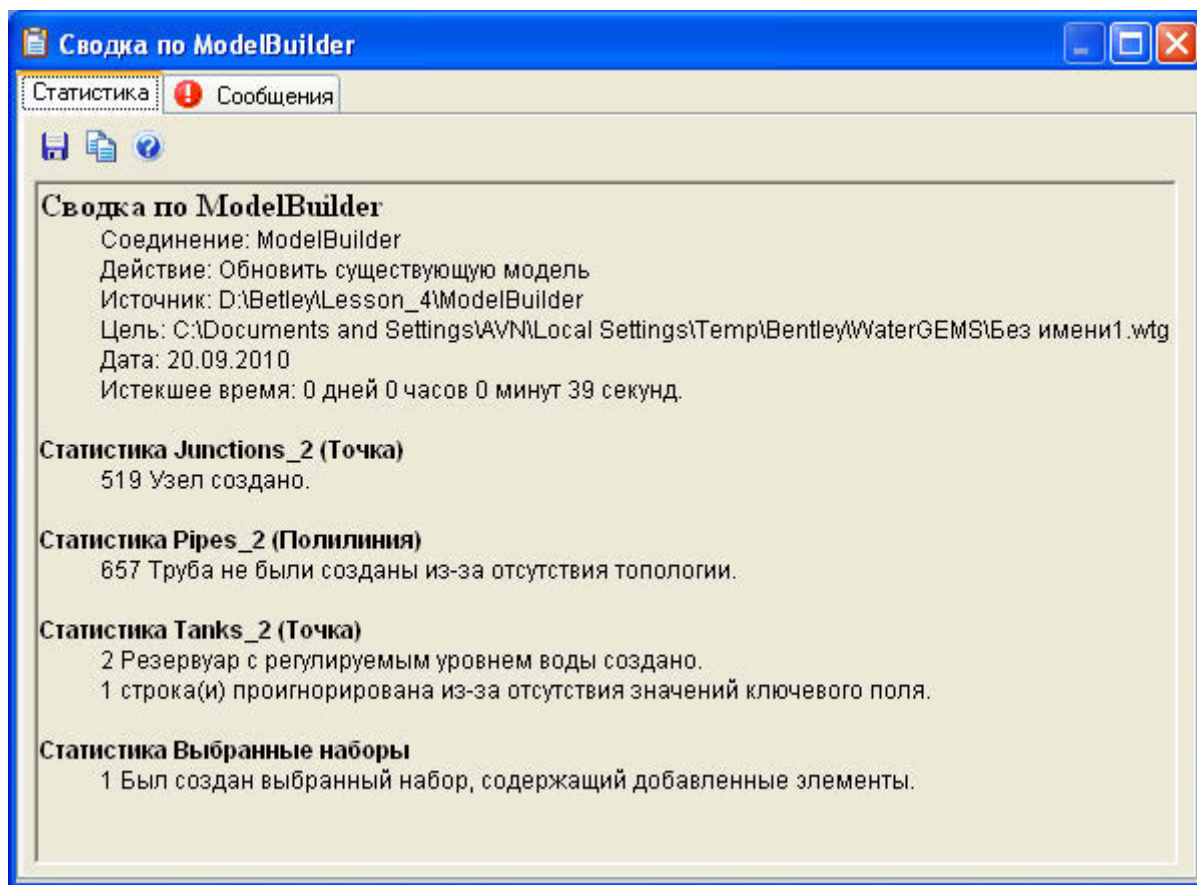



Рис. 4.16. Сообщение о результатах импорта

Проанализировав содержимое окна, вы обнаружите, что импорт выполнен с ошибками. Программе не удалось создать трубы. Перечень обнаруженных ошибок представлен на вкладке *Сообщения*, где программа указывает, что не может обнаружить начальные и конечные узлы трубопроводов.

Повторим процедуру импорта для исправления ошибок. Нажмите кнопку  – *Дублировать* в окне ModelBuilder. Программа создаст копию сценария импорта. Двойным щелчком запустите мастер процедуры импорта по копии сценария. С помощью клавиши *Вперед* перейдите ко второму шагу.

В этом окне нужно отметить пункт *Установить связность пространственных данных*. Значение параметра *Точность* задайте

---

1 фут (30,5 см). Во вводной части данного раздела этот параметр назван допуском (толерантностью).

Тем самым мы даем программе указание, что точки, расположенные на расстоянии не более одного фута, следует считать одной точкой.

Это единственное исправление, которое необходимо сделать. С помощью кнопки *Вперед* дойдите до последнего шага и завершите работу мастера.

После окончания импорта программа должна вывести отчет без ошибок.

Последовательно закройте окно отчета и ModelBuilder. Дайте утвердительный ответ на вопрос программы о необходимости синхронизации схемы.

Через некоторое время вы увидите импортированную схему на экране (рис. 4.17).

С целью проверки введенных данных откройте таблицу *Узел*. Для удобства отсортируйте (правая кнопка мыши) строки таблицы по возрастанию значений поля *Elevation* (высота).

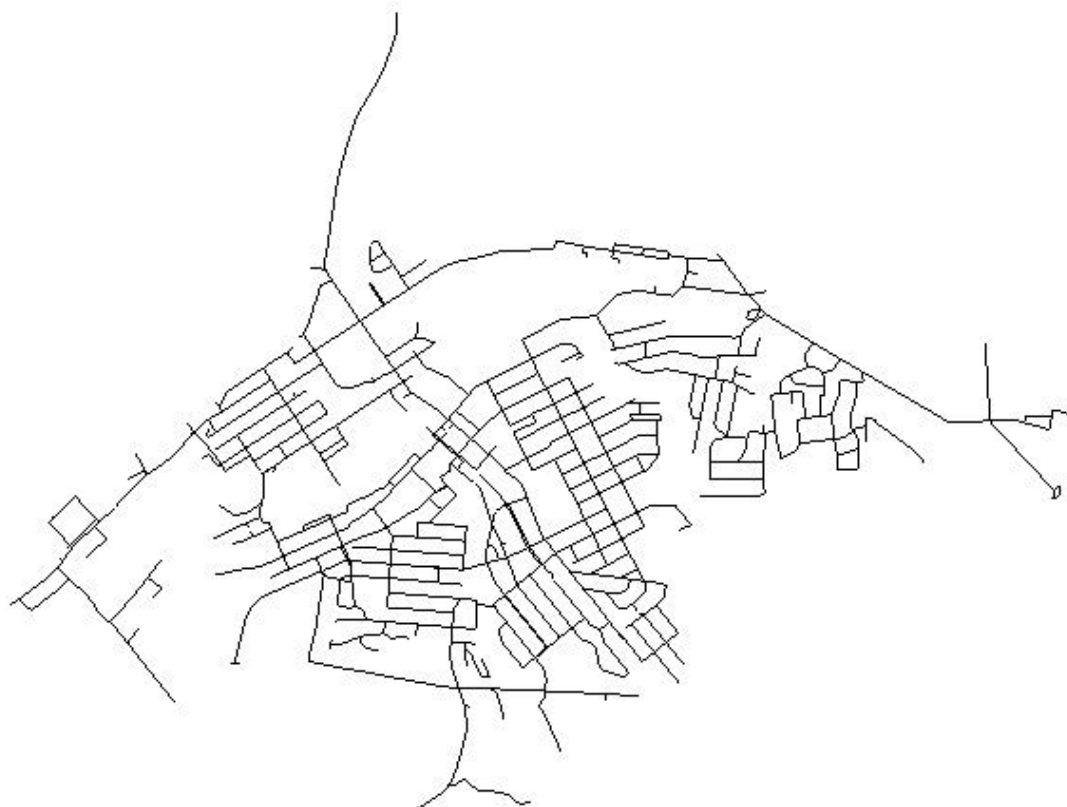


Рис. 4.17. Импортированная схема сети



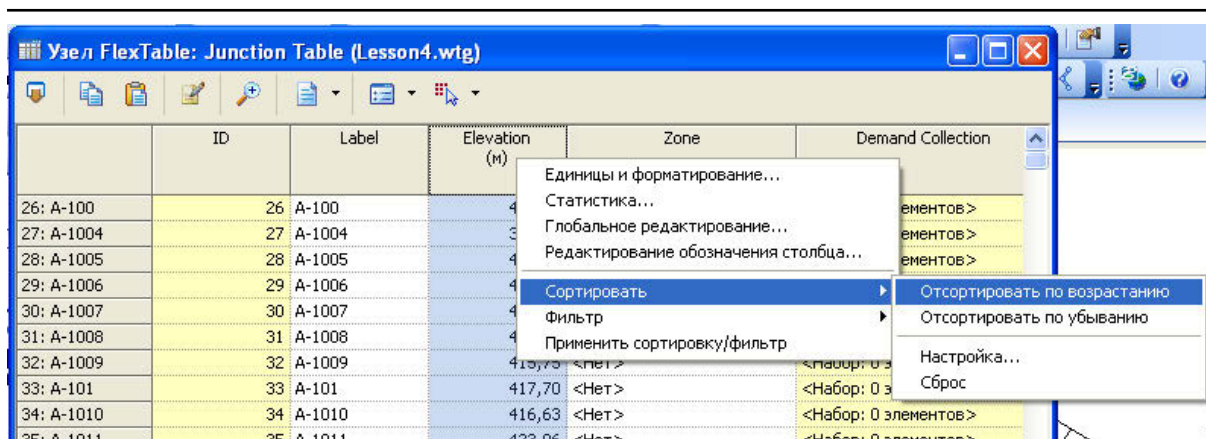


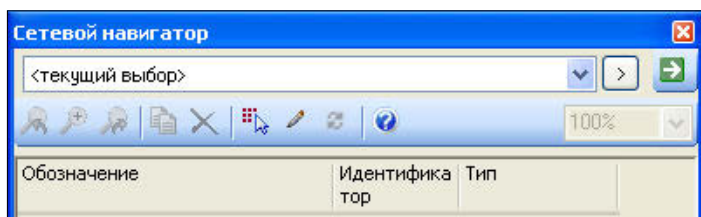
Рис. 4.18. Сортировка

Обратите внимание, что высотные отметки некоторых узлов отсутствуют (вероятно, по каким-то причинам их забыли ввести в ГИС). Имеются и другие неточности, но поскольку гидравлический расчет этой сети будет выполняться позднее, отсутствующие данные пока вводить не будем. Рекомендуем сохранить проект.

### 4.3. Использование сетевого навигатора

Сетевой навигатор предназначен для детального исследования конфигурации сети. С его помощью можно, например, находить:


- изолированные узлы, т. е. не принадлежащие ни одной из труб;
- узлы и трубы, расположенные слишком близко друг к другу;
- пересекающиеся трубопроводы и т. д.



4.19. Сетевой навигатор

Для его запуска активизируйте пункт главного меню **Вид – Сетевой навигатор** (рис. 4.19). Рассмотрим несколько примеров использования навигатора.

#### 4.3.1. Поиск труб, проходящих рядом с узлами, которые им не принадлежат

В окне навигатора нажмите кнопку  и в раскрывающемся меню выберите пункт *Обзор сети – Кандидаты на разделение труб* (рис. 4.20).

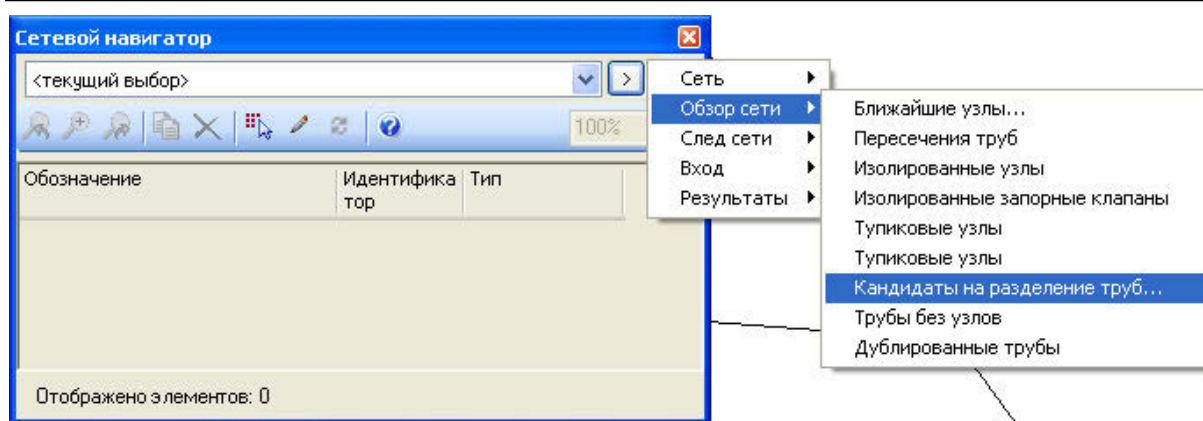


Рис. 4.20. Меню навигатора

Задайте допуск (расстояние от узла до ближайшей трубы) 6 м (рис. 4.21).

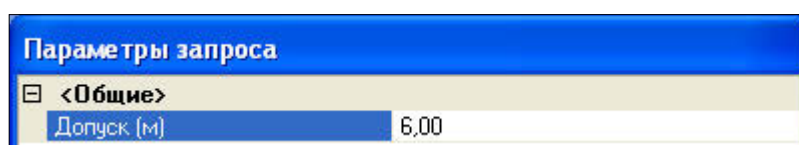



Рис. 4.21. Задание допуска

После нажатия кнопки **OK** программа найдет узлы, отвечающие заданному условию. Для их поиска на схеме нажмите кнопку  – *Масштабировать* (рис. 4.22).

В каждом таком случае необходимо убедиться, что схема сети действительно не содержит ошибок и при необходимости внести исправления, в том числе и в исходную схему ГИС.

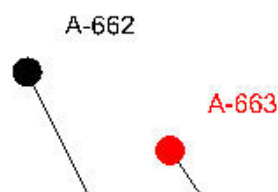
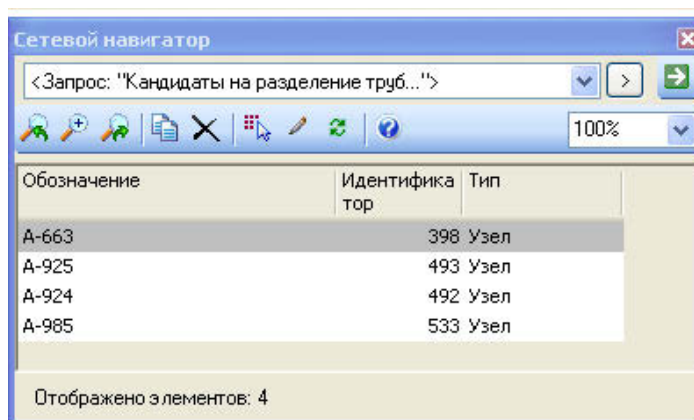


Рис. 4.22. Результаты поиска

### 4.3.2. Поиск близко расположенных узлов

Узлы, которые расположены рядом друг с другом, часто тоже дают повод для проверки правильности исходной схемы. Для их обнаружения предназначен пункт меню *Обзор сети* – *Ближайшие*

узлы. При его активизации вы снова должны задать допуск, например, 9 м (рис. 4.23).

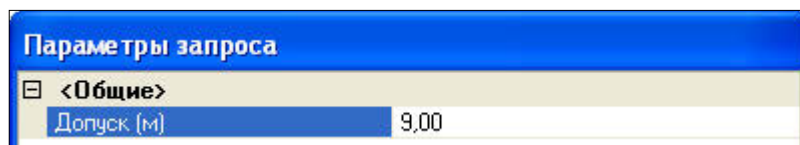


Рис. 4.23. Задание допуска

Кнопка  позволит вам найти такие узлы на схеме (рис. 4.24).

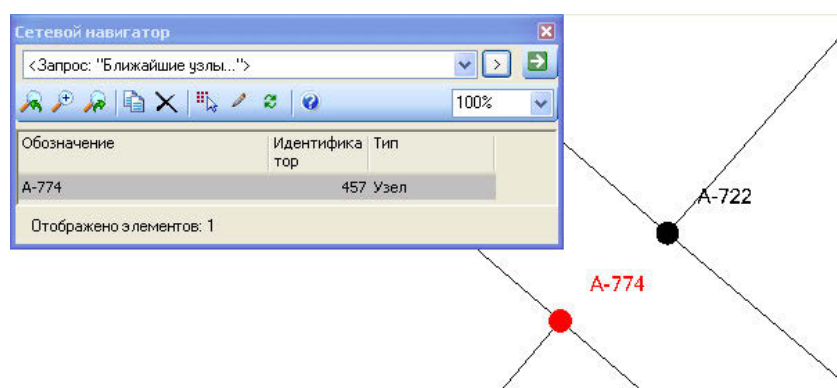



Рис. 4.24. Результаты поиска

### 4.3.3. Поиск изолированных узлов

Для выполнения этой операции предназначен пункт меню *Обзор сети – Изолированные узлы*. Если вы активизируете его, то обнаружите, что на схеме таких узлов нет. Предлагаем вам создать хотя бы один изолированный узел искусственно. Установите его в произвольной точке схемы с помощью кнопки  панели элементов сети.

Вновь осуществите поиск изолированных узлов и убедитесь, что созданный вами узел найден (рис. 4.25).

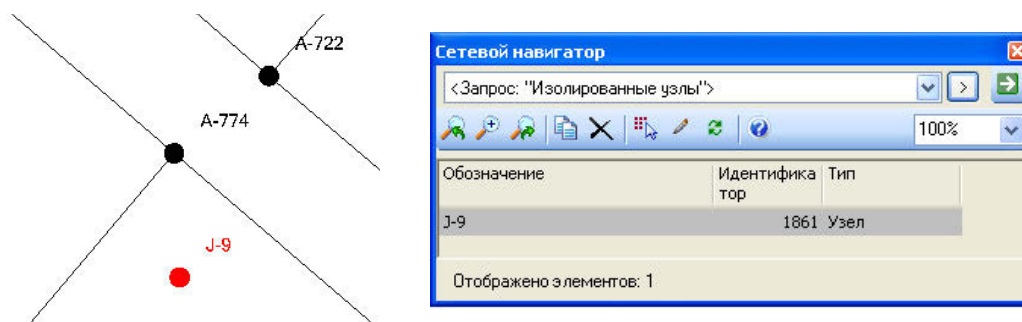


Рис. 4.25. Поиск изолированных узлов



---

## 5. Упрощение схемы сети

### 5.1. Цель и принципы упрощения расчетной схемы

Обычно схемы сетей, импортированные из ГИС или САД-систем, с точки зрения гидравлических расчетов являются избыточными и нуждаются в корректировке. Действительно, в исходные схемы с целью учета стараются включить по возможности *все* трубопроводы. В них, например, включают относительно короткие тупиковые трубопроводы небольших диаметров для подачи воды к отдельным потребителям с весьма низким среднечасовым расходом воды. Скорость движения воды в таких трубопроводах оказывается настолько малой, что потерями напора в них можно пренебречь.

С точки зрения гидравлического моделирования включение таких трубопроводов в схему сети не повышает точность расчетов, но усложняет ввод и корректировку исходных данных, повышает вероятность допущения ошибок, затрудняет анализ результатов.

Математическая модель сети должна быть адекватна реальной, т. е. правильно описывать ее поведение в различных режимах работы. Достижение адекватности (калибровка модели) – очень важный этап работы, и он специально будет рассмотрен далее. Здесь же отметим, что калибровка модели сети может быть выполнена только с использованием экспериментальных данных: сведений о напорах в узлах и расходах в трубопроводах.

Чем сложнее расчетная схема, тем больше экспериментальных данных требуется для ее калибровки. К сожалению, экспериментальное исследование реальных сетей водоснабжения сопряжено с большими трудностями как технического, так и организационного характера. В частности, очень часто измерения приходится проводить не там, где нужно, а там, где можно.

Именно по этим, а иногда и по каким-либо иным, к сожалению, слабо обоснованным субъективным причинам в расчетную схему сети включают далеко не все трубопроводы, а лишь те, которые оказывают наиболее существенное влияние на поведение моделируемой сети. Конечно, понятие «наиболее существенное влияние» весьма неопределенное, и часто роль того или иного трубопровода в работе сети можно установить только в ходе расчета.

---

Основное правило упрощения сети заключается в том, что ее характеристика, т. е. зависимость напора на входе сети от расхода воды, не должна изменяться.

В иностранной литературе и программе WaterGEMS процесс упрощения схемы сети обозначают термином *skeletonization* – выделение каркаса, скелетизация.

Допустим, что имеется некоторая исходная схема (рис. 5.1). Сначала на ней необходимо отметить защищенные узлы, т. е. такие, которые при упрощении ни в коем случае не должны удаляться из схемы. На практике такими узлами, безусловно, являются те, в которых производится измерение напора, или ограничивающие трубопроводы, где измеряется расход с целью последующей калибровки.

Пусть на рассматриваемой схеме от удаления защищен узел А. На первом шаге упрощения удаляются тупиковые ветви (рис. 5.2).

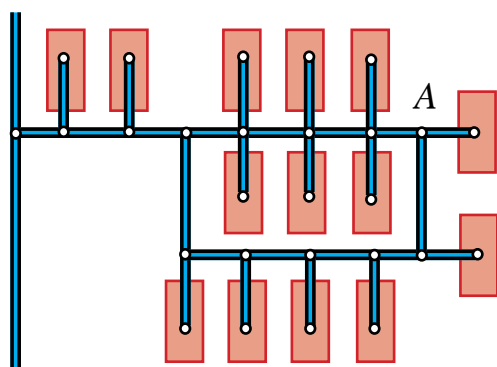


Рис. 5.1. Исходная схема

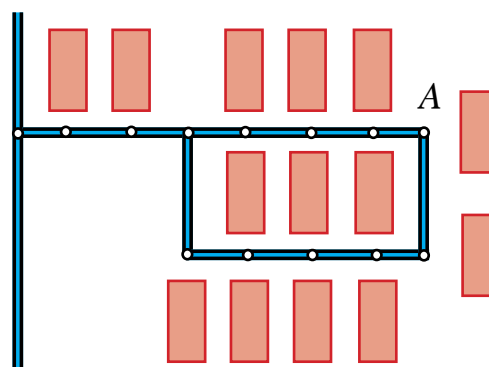


Рис. 5.2. Удаление тупиков

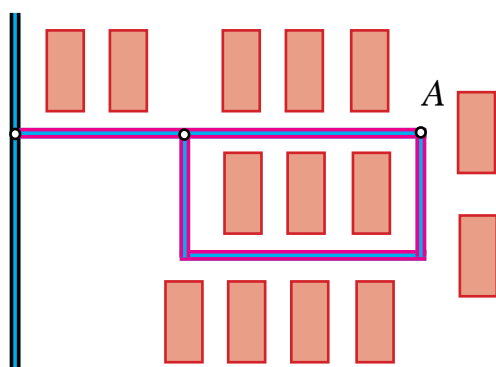
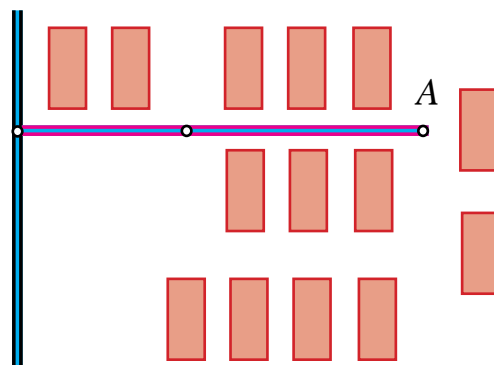


Рис. 5.3. Объединение последовательных участков

В результате этой операции образовались последовательно соединенные трубы, которые можно объединить на следующем шаге в так называемые эквивалентные участки. Защищенный узел не удаляется, поэтому на схеме (рис. 5.3) присутствуют три эквивалентных участка. Отборы в удаленных узлах распределены между оставшимися.

Теперь на схеме образовались два параллельных участка. Они могут быть заменены одним эквивалентным трубопроводом (рис. 5.4).

Как видно, после этого шага упрощения на схеме вновь образовалась тупиковая ветвь, состоящая из двух последовательных трубопроводов, т. е. упрощение может быть продолжено и далее при условии снятия защиты с узла А.



*Рис. 5.4. Результат объединения параллельных участков*

На каждом шаге гидравлические параметры сети в той или иной степени изменяются, поэтому упрощение всегда должно сопровождаться проведением контрольных гидравлических расчетов. Только с их помощью можно убедиться в корректности тех или иных изменений сети.

## 5.2. Виды упрощений

Обычно сразу после импорта схемы сети из нее удаляют трубопроводы, удовлетворяющие определенным критериям (устанавливают фильтр). Например, программе можно поставить задачу: «Удалить все трубопроводы с диаметрами менее 100 мм и длиной меньше 20 м». Конечно, имеется возможность добавить к этому заданию исключения, т. е. указать те трубопроводы, которые не должны удаляться ни в коем случае.

Современные программы, в том числе и WaterGEMS, выполняют интеллектуальное удаление. На схеме сети остаются не только те элементы, которые относятся к заданным пользователем исключениям, но и те, которые могли бы нарушить связность сети. Иными словами, не допускается появление изолированных сегментов сети и отдельных узлов.

Следующая процедура, которая может выполняться автоматически, – удаление тупиковых ветвей (рис. 5.5). Тупиковые ветви определяются программой путем анализа топологии сети. После удаления какой-либо ветви тупиковый узловой отбор автоматически прибавляется к узлу, расположенному выше по течению.

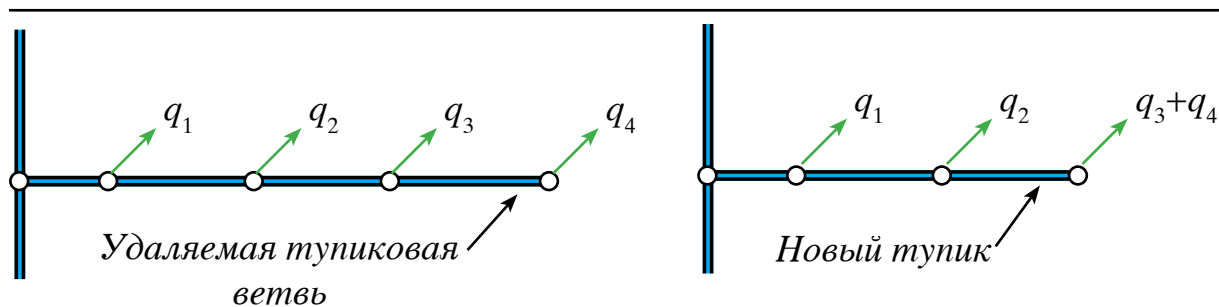


Рис. 5.5. Удаление тупиковой ветви

Рассмотренный выше пример показывает, что сразу все тупиковые ветви не удаляются, поскольку они часто возникают в ходе самого процесса упрощения. В таких случаях операцию повторяют.

Конечно, в программах предусмотрена возможность отметить на схеме тупиковые ветви, которые не должны удаляться ни в коем случае. Обычно такими ветвями являются те, по которым вода подается к крупным потребителям.

Еще одним способом упрощения схемы является объединение последовательных трубопроводов.

Постановка задачи такова. Пусть имеются два трубопровода с различными длинами и диаметрами (рис. 5.6). Их необходимо заменить одним эквивалентным трубопроводом. При этом потери напора в эквивалентной трубе должны равняться суммарным потерям напора в исходных трубах.

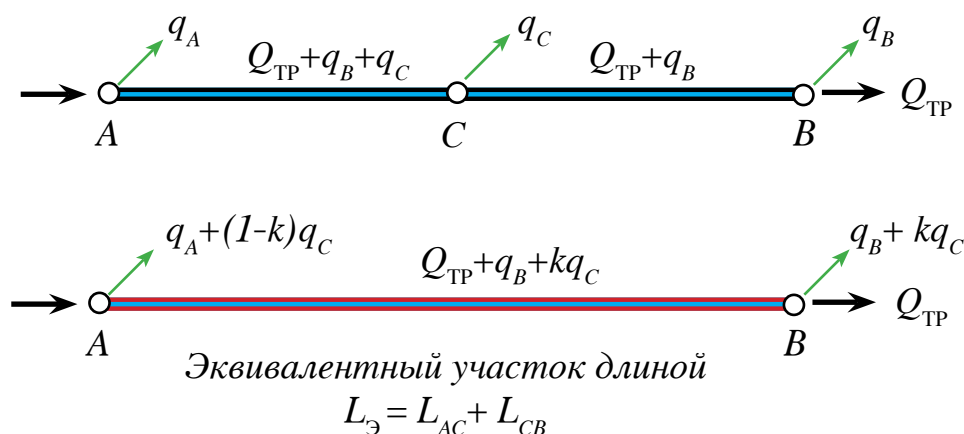


Рис. 5.6. Объединение последовательных участков

Поскольку узел  $C$  (см. рис. 5.6) удаляется, его отбор необходимо перераспределить между узлами  $A$  и  $B$ . Введем коэффициент  $k$ , находящийся в диапазоне от нуля до единицы, который позволяет разделить отбор  $q_C$  между узлами эквивалентного участка.

Потери напора в исходной системе равны (в обозначениях рис. 5.6):

$$H_A - H_B = B_{AC}(Q_{TP} + q_B + q_C)^2 + B_{CB}(Q_{TP} + q_C)^2.$$

Потери напора в эквивалентной трубе:

$$H_A - H_B = B_{\Theta}(Q_{TP} + q_B + kq_C)^2.$$

Таким образом, сопротивление эквивалентного участка

$$B_{\Theta} = \frac{B_{AC}(Q_{TP} + q_B + q_C)^2 + B_{CB}(Q_{TP} + q_C)^2}{(Q_{TP} + q_B + kq_C)^2}.$$

Поскольку расход  $Q_{TP}$  не известен, из данного выражения следует, что до выполнения гидравлического расчета найти сопротивление эквивалентного участка невозможно. Остается допустить, что расход  $Q_{TP}$  во много раз превышает отборы, что часто соответствует действительности. Тогда ими можно пренебречь. Сокращая выражения в скобках, получим:

$$B_{\Theta} = B_{AC} + B_{CB}.$$

Методика определения сопротивления и геометрических параметров эквивалентного участка зависит от принятой модели расчета потерь напора.

В любом случае во избежание изменения конфигурации сети его длина равняется сумме длин исходных трубопроводов:

$$L_{\Theta} = L_{AC} + L_{CB}.$$

Диаметр эквивалентного участка обычно принимается равным диаметру какой-либо исходной трубы. Очень часто таким же образом задают и его шероховатость.

Если потери напора рассчитываются по формуле Хазена – Вильямса, то задают один из параметров – либо диаметр, либо шероховатость (точнее,  $C$ -фактор). Тогда другой параметр можно рассчитать. Например, если задан диаметр эквивалентной трубы  $d_{\Theta}$ , то ее  $C$ -фактор:

$$C_{\Theta} = \frac{\frac{L_{\Theta}^{0,54}}{d_{\Theta}^{2,65}}}{\frac{L_{CB}^{0,54}}{C_{CB}^{1,85} d_{CB}^{4,87}} + \frac{L_{AC}^{0,54}}{C_{AC}^{1,85} d_{AC}^{4,87}}}.$$

Коэффициент  $k$  определяют несколькими способами. В самом простом случае отбор  $q_C$  просто делят пополам, т. е.  $k = 0,5$ .

В ряде случаев, возможно, более целесообразно разделить этот отбор пропорционально диаметрам исходных участков или длине. Например,

$$k = \frac{L_{CB}}{L_{\Sigma}} .$$

Довольно часто разделение  $q_C$  производят пропорционально отборам:

$$k = \frac{q_B}{q_A + q_B} .$$

Конечно, каждая программа предоставляет возможность задать коэффициент  $k$  произвольно.

Некоторые последовательные участки объединять не нужно. Например, если в узле  $C$  (см. рис. 5.6) расположен пожарный гидрант, то его удаление осложнит анализ работы сети в режиме пожаротушения.

Объединение параллельных участков позволяет уменьшить количество участков сети без изменения количества узлов.

Пусть имеются два трубопровода с различными длинами и диаметрами (рис. 5.7). Их необходимо заменить одним эквивалентным трубопроводом. При этом потери напора в эквивалентной трубе должны равняться потерям напора в исходной параллельной системе.

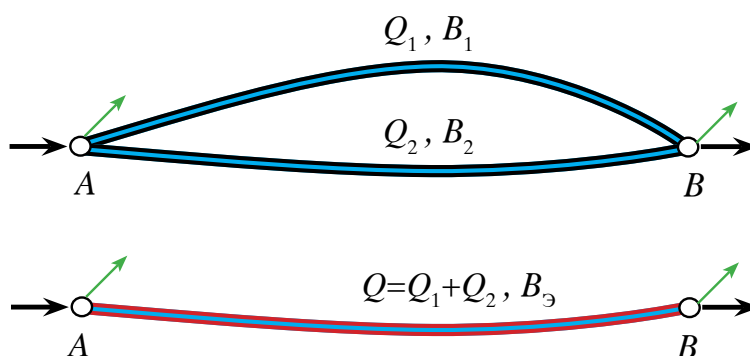


Рис. 5.7. Объединение параллельных участков

Потери напора в исходной системе равны (в обозначениях рис. 5.7):

$$H_A - H_B = B_1 Q_1^2 = B_2 Q_2^2 .$$

---

Потери напора в эквивалентной трубе:

$$H_A - H_B = B_{\text{э}} (Q_1 + Q_2)^2.$$

Таким образом, сопротивление  $B_{\text{э}}$  определяется из соотношения:

$$B_{\text{э}} = \left( \frac{1}{\sqrt{B_1}} + \frac{1}{\sqrt{B_2}} \right)^{-2}.$$

Методика определения сопротивления и геометрических параметров эквивалентного участка зависит от принятой модели расчета потерь напора.

В любом случае во избежание изменения конфигурации сети длина и форма эквивалентного участка принимаются такими же, как у какого-либо исходного трубопровода.

Если потери напора рассчитываются по формуле Хазена – Вильямса, то задают еще один параметр – либо диаметр, либо  $C$ -фактор. Тогда другой – рассчитывают. Например, если задан  $d_{\text{э}}$ , то:

$$C_{\text{э}} = \frac{L_{\text{э}}^{0,54}}{d_{\text{э}}^{2,65}} \left( \frac{C_1 d_1^{2,63}}{L_1^{0,54}} + \frac{C_2 d_2^{2,63}}{L_2^{0,54}} \right).$$

Каждый шаг упрощения вносит изменения в конфигурацию сети и влияет в той или иной степени на результаты ее гидравлического расчета.

### 5.3. Упрощение схемы сети в среде WaterGEMS


#### 5.3.1. Исходная схема

Процедуру упрощения сети мы рассмотрим на примере ранее импортированной схемы. В нее для уменьшения объема подготовительных операций внесены некоторые дополнения, в частности:

- добавлен насос;
- создан дополнительный сценарий *Пожар в А-100*, при котором отбор в этом узле возрастает с 0,2 до 64 л/с;
- задана схема цветового кодирования диаметров трубопроводов;
- к обозначениям узлов на схеме добавлены аннотации для отображения значений гидростатических напоров непосредственно на схеме.

Все изменения сохранены в виде проекта *Skelebrator\_Start.wtg* (разработан фирмой Bentley). Именно его и нужно открыть.

Процесс упрощения сети в иностранной литературе называется скелетизация. В русской версии WaterGEMS соответствующий модуль называется *Skelebrator*.

Запустите *Skelebrator* с помощью кнопки  или активизируйте пункт главного меню **Инструменты – Skelebrator Skeletonizer**.

Обратите внимание на перечень возможностей данного модуля в левой части окна *Skeletonizer* (рис. 5.8).

Поскольку в ходе работы будет имитироваться подача воды на тушение пожара в узле **A-100**, то его необходимо защитить, чтобы в процессе упрощения схемы он ни в коем случае не был удален.

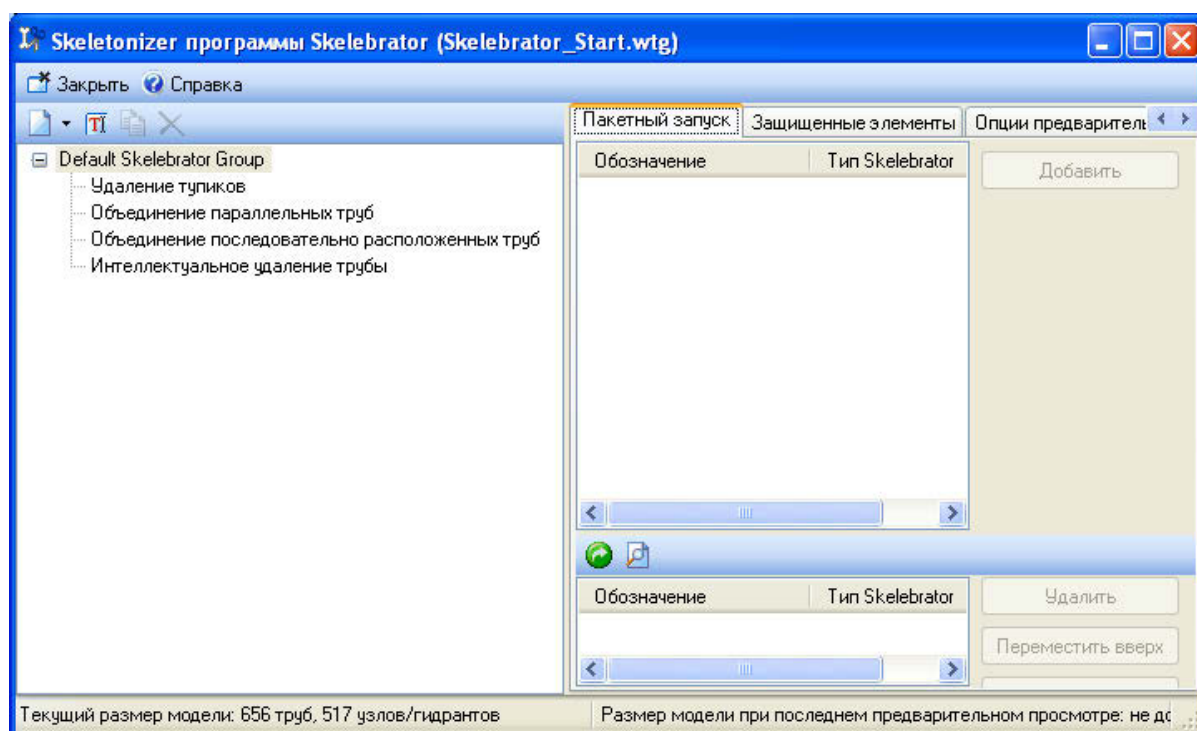





Рис. 5.8. Окно программы *Skelebrator*

Откройте вкладку *Защищенные элементы* и нажмите кнопку  – *Выбрать из схемы*.

Нажмите кнопку  на плавающей панели *Выбрать* для автоматического поиска узла. Введите имя узла в окне *Найти*. Программа выведет список всех элементов сети, имена которых начинаются с указанных символов (рис. 5.9). Конкретизируйте



объект поиска: нажмите *OK* и кнопку  – *Готово* на плавающей панели. Узел **A-100** будет защищен (рис. 5.10).

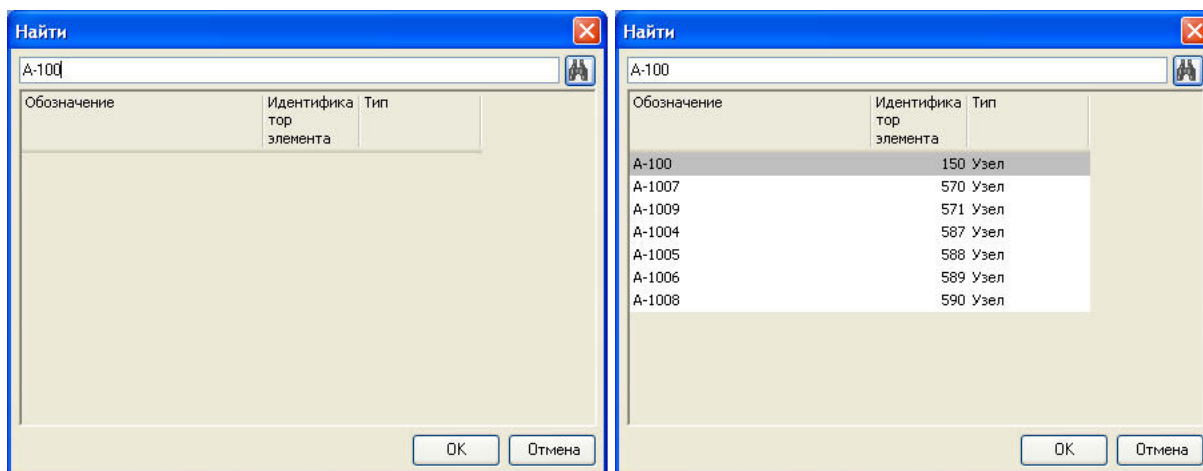


Рис. 5.9. Поиск элемента

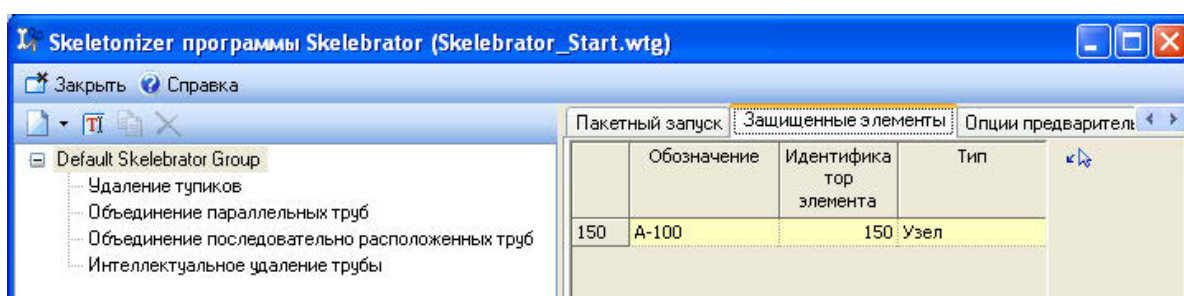



Рис. 5.10. Перечень элементов, защищенных от удаления

Временно сверните окно *Skeletonizer*.

Кнопкой  откройте менеджер сценариев и выполните пакетный запуск гидравлического расчета (рис. 5.11). С целью последующего сравнения различных вариантов упрощения схемы определим некоторые параметры исходной сети.

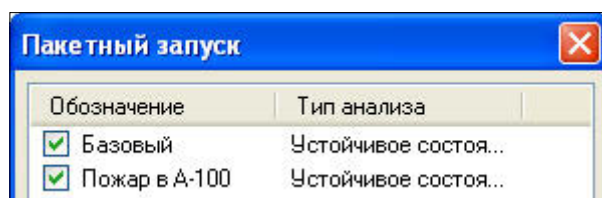


Рис. 5.11. Пакетный запуск гидравлического расчета

Сведения об общем количестве труб и узлов вы найдете в нижней части окна *Skelebrator* или в отчете, который вызывается с помощью

пункта главного меню **Отчет – Инвентаризация проекта**. Сейчас схема содержит 656 труб и 517 узлов.

Рассчитанные напоры в узлах отображаются непосредственно на схеме, поскольку необходимые аннотации заранее включены в данный проект (рис. 5.12, 5.13).

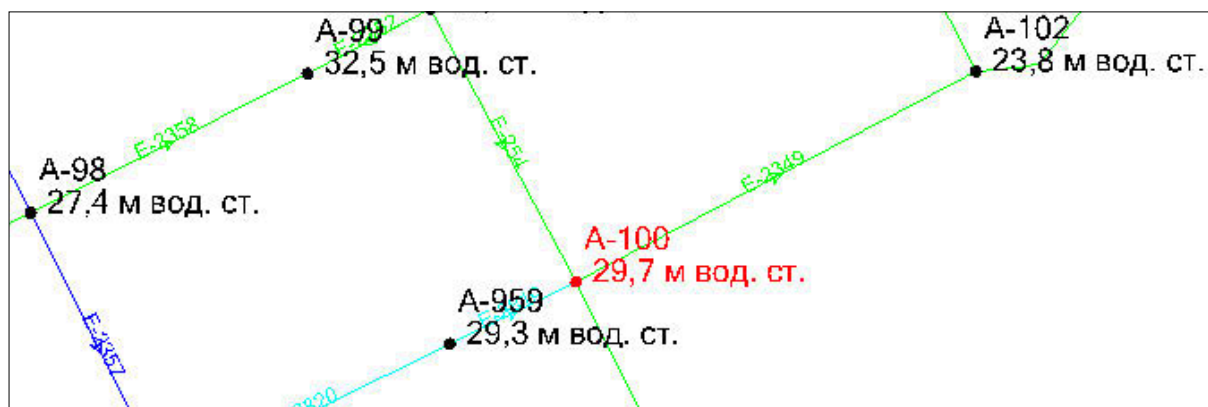


Рис. 5.12. Результаты расчета по сценарию «Базовый»

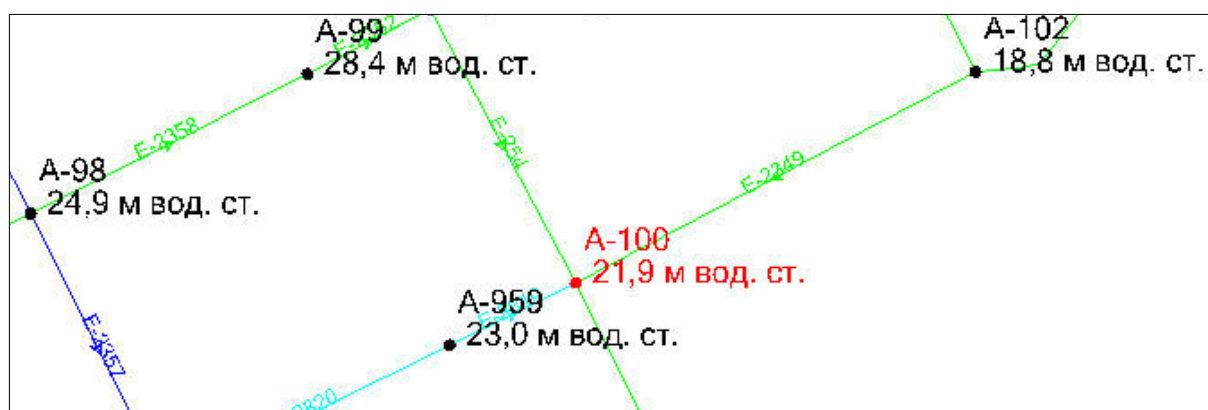



Рис. 5.13. Результаты расчета по сценарию «Пожар в A-100»

Режим работы насоса характеризуется рабочей точкой, т. е. точкой пересечения двух характеристик – сети и насоса. В ходе упрощения схемы характеристика насоса останется неизменной, а характеристика сети будет меняться. В качестве ее характерных точек далее будем считать напоры при расходах 0 и 150 л/с.

Для определения рабочей точки в базовом сценарии найдите на схеме насос РМР-1. Щелчком правой кнопки откройте контекстное меню, а в нем активизируйте пункт *Кривая напора системы*.

В одноименном окне введите максимальный расход 150 л/с для расчета характеристики сети и запустите его кнопкой  (рис. 5.14).

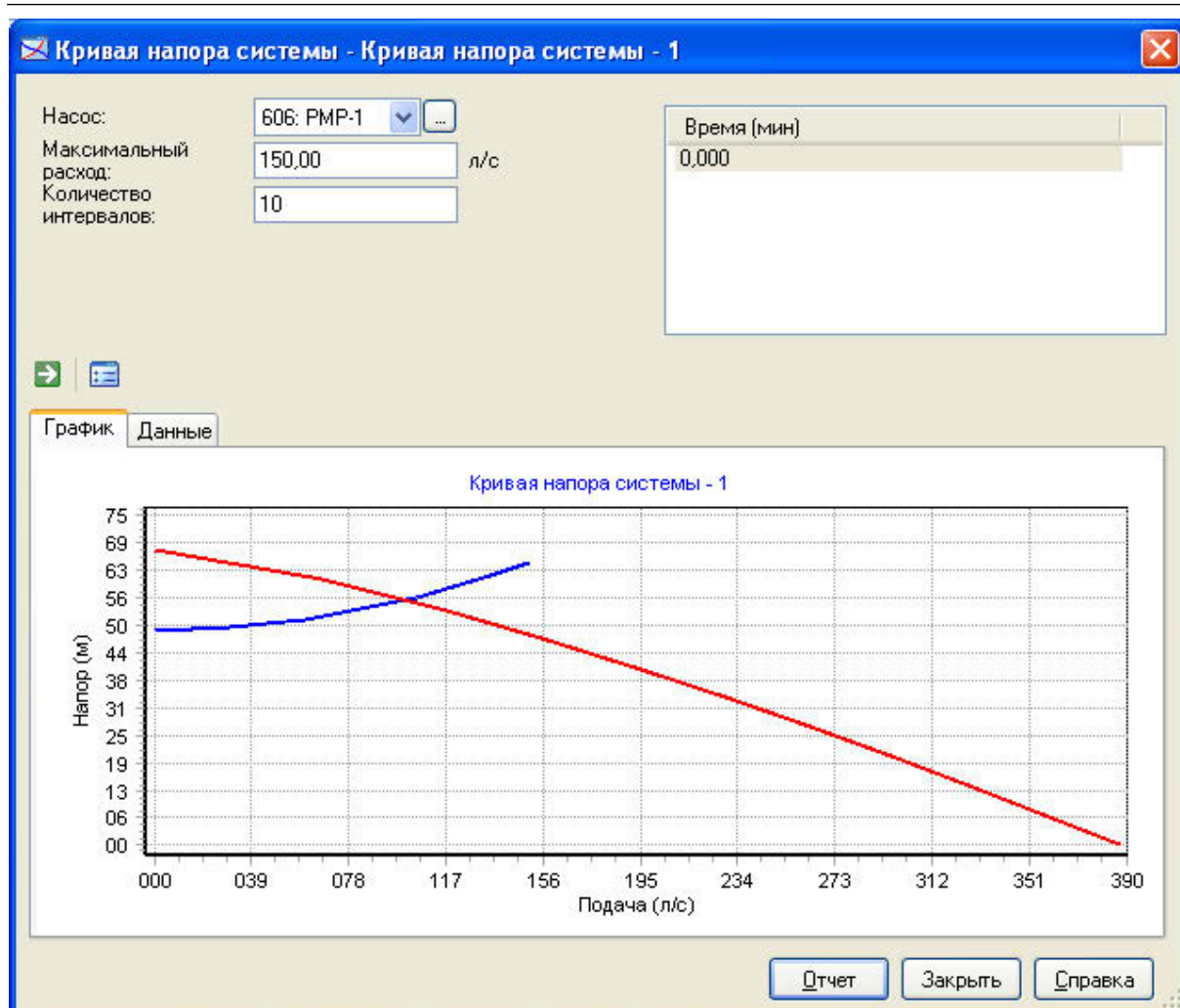


Рис. 5.14. Определение рабочей точки

В таблице на вкладке *Данные* вы увидите, что расходу 0 л/с соответствует напор 48,4, а расходу 150 л/с – напор 63,9 м.


Закройте окно *Кривая напора системы* и в ответ на запрос программы сохраните кривую напора системы.

Результаты этого расчета мы занесли в сводную таблицу (см. п. 5.3.4). Сохраните проект под новым именем, поскольку он понадобится нам позже.

Теперь рассмотрим несколько способов упрощения схемы.

### 5.3.2. Удаление труб по условию

Сначала попробуем просто удалить из схемы все трубы с относительно небольшими диаметрами, например менее 152 мм (6 дюймов, in).

Откройте окно *Skeletonizer* и установите курсор на пункт *Интеллектуальное удаление труб*. Нажмите кнопку  – *Создать*. Задайте показанные на рис. 5.15 параметры на вкладке *Установки*.

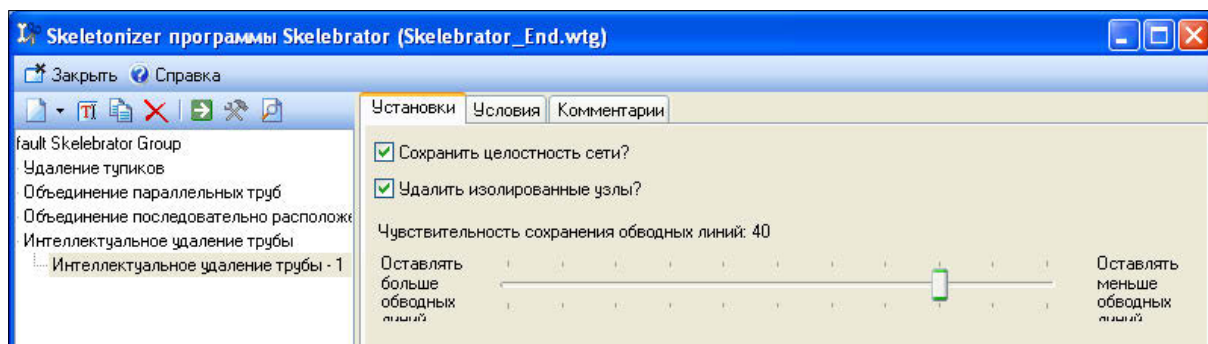


Рис. 5.15. Параметры интеллектуального удаления труб

Перейдите к вкладке *Условия*, нажмите кнопку *Добавить* и введите условия удаления труб (рис. 5.16).

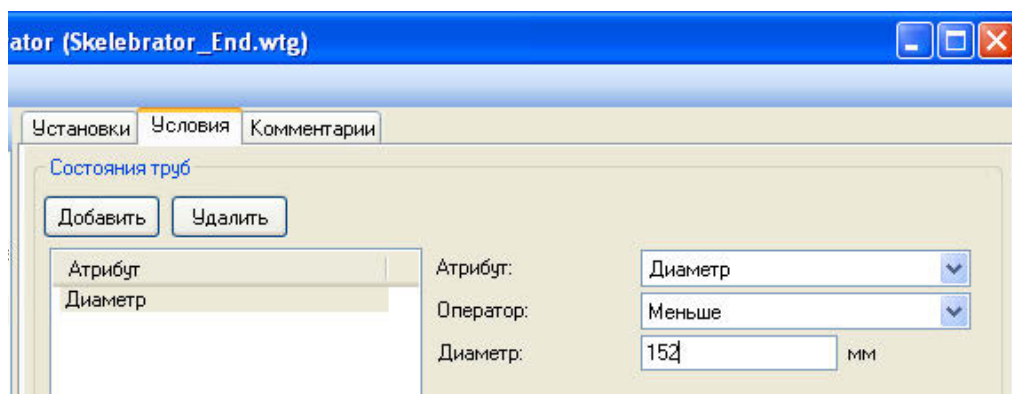




Рис. 5.16. Условие интеллектуального удаления труб

Нажмите кнопку  – *Предварительный просмотр* окна *Skeletonizer* и после завершения вычислений минимизируйте его.

Удаляемые участки сети и узлы будут показаны на схеме (рис. 5.17). Обратите внимание, что с целью сохранения связности сети программа удаляет далеко не все трубы, диаметр которых удовлетворяет заданному условию.



Рис. 5.17. Удаляемые трубы (предварительный просмотр)

После просмотра схемы восстановите окно *Skeletonizer* и нажмите кнопку  – *Автоматически* для выполнения окончательного расчета. Обратите внимание на предупреждение программы о невозможности отмены изменений схемы.

После окончания вычислений *Skeletonizer* покажет результаты работы (рис. 5.18). Программа удалила из исходной схемы 152 трубы и 66 узлов.

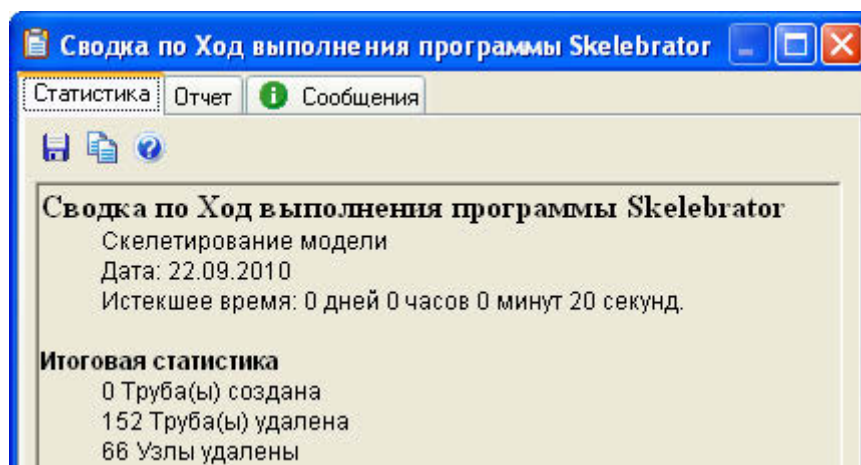


Рис. 5.18. Результаты удаления труб



---

Для сравнения параметров упрощенной и первоначальной схемы выполните гидравлический расчет, как вы делали это ранее.

Найдите узел А-100. Вы обнаружите, что напор при сценарии *Базовый* остался прежним, а при сценарии *Пожар в А-100* уменьшился с 21,9 до 12,4 м. Построив кривую напора системы (сценарий *Базовый*), определим, что потребный напор при расходе 150 л/с после упрощения схемы составляет 63,4 м, т. е. изменяется мало.

Рекомендуем сравнить результаты вашего расчета с приведенными в сводной таблице (см. п. 5.3.4).

Выполним еще один шаг упрощения – удалим трубы с диаметрами меньше или равными 203,2 мм (8 дюймов). Для этого достаточно отредактировать поле *Оператор* (рис. 5.19).

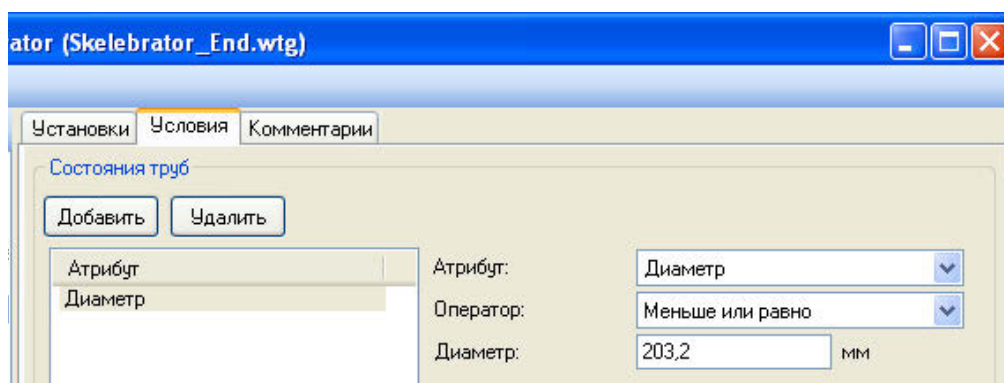


Рис. 5.19. Условие интеллектуального удаления труб

Выполните процедуру удаления труб и гидравлический расчет сценариев в пакетном режиме. В новой схеме должно остаться 353 трубы и 329 узлов.

Вновь найдите узел А-100. В нем напор при сценарии *Базовый* остался прежним, а при пожаре уменьшается до 12,4 м. Построив кривую напора системы (сценарий *Базовый*), вы сможете убедиться, что гидравлическое сопротивление сети заметно меняется. Рекомендуем сравнить результаты вашего расчета с приведенными в сводной таблице (см. п. 5.3.4).

В целом можно сделать заключение, что упрощение сети только путем удаления труб определенных диаметров при некоторых режимах ее работы (в данном случае при увеличении потребления) может приводить к существенным ошибкам.

Далее нам предстоит проверить эффективность других способов упрощения.

### 5.3.3. Удаление тупиков, объединение последовательных и параллельных участков

Откройте ранее сохраненный файл проекта, содержащий исходную схему сети. Для проверки выполните гидравлический расчет сценариев в пакетном режиме. Результаты расчетов должны быть такими же, что и в первой строке сводной таблицы (см. п. 5.3.4).

Рекомендуем сохранить проект под новым именем.

Запустите *Skelebrator*. Установите курсор на пункт *Объединение последовательно расположенных труб* и нажмите кнопку *Создать* в окне *Skeletonizer*. Задайте параметры, показанные на рис. 5.20.

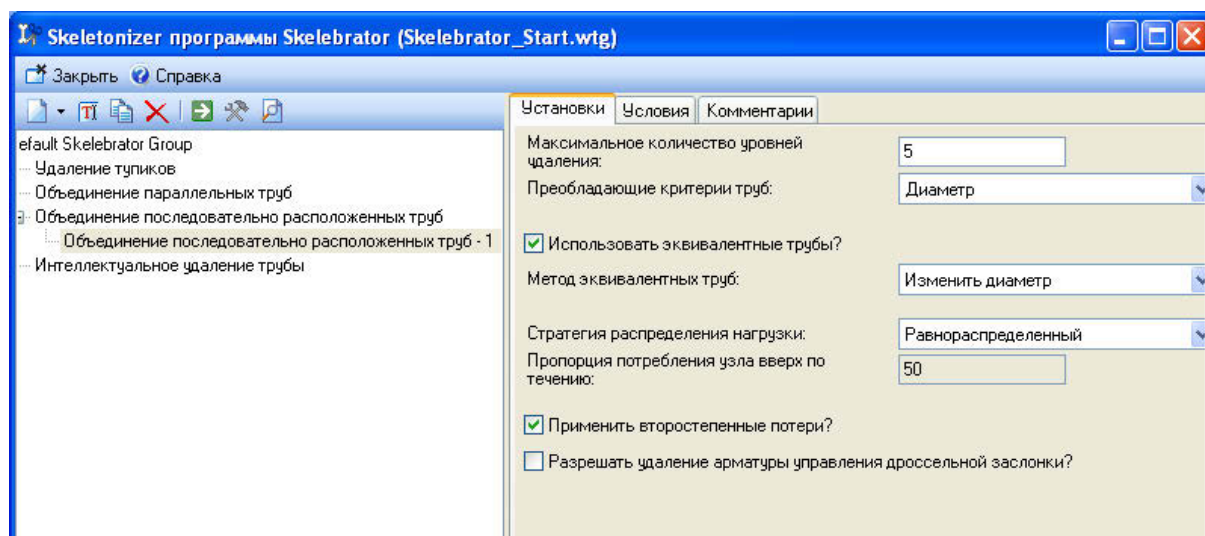



Рис. 5.20. Параметры объединения последовательных участков сети

Нажмите кнопку  – *Предварительный просмотр*. После завершения вычислений минимизируйте окно *Skeletonizer*. Объединяемые участки сети и узлы будут выделены на схеме.

Рекомендуем воспользоваться инструментами изменения масштаба чертежа для более детального просмотра предполагаемых изменений.

Восстановите окно *Skeletonizer* и запустите расчет в автоматическом режиме.

После его окончания на экран будет выведена сводка результатов объединения (рис. 5.21).



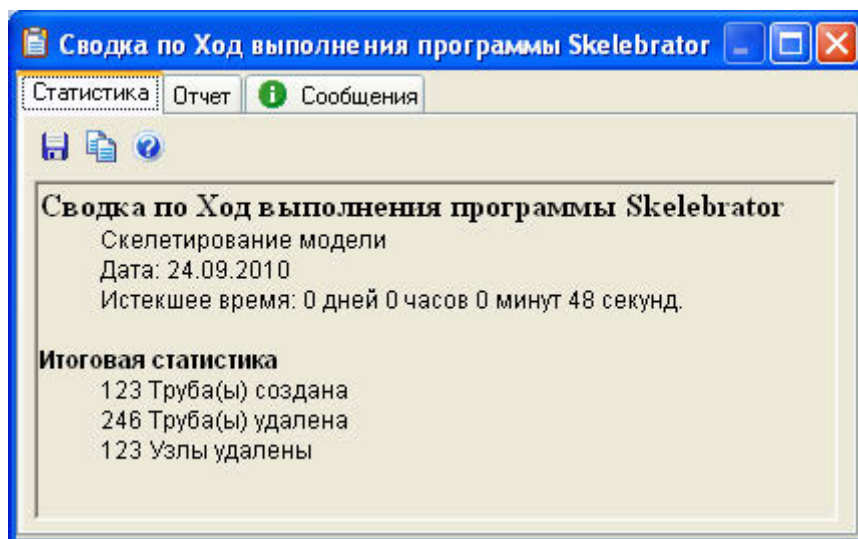


Рис. 5.21. Результаты объединения последовательных участков

Программа заменила последовательные участки, в том числе имеющие различные диаметры, эквивалентными трубами с постоянными по их длине диаметрами. Их значения вычислены из условия равенства гидравлических сопротивлений удаляемых и эквивалентных участков.

При этом, конечно, были удалены некоторые узлы. Отборы в удаленных узлах программа поделила поровну между конечными узлами соответствующих эквивалентных труб. Результаты расчета вы найдете в строке 4 сводной таблицы (см. п. 5.3.4).

Самостоятельно удалите из схемы трубопроводы с диаметрами меньше или равными 101,6 мм (4 дюйма). Для сравнения параметров упрощенной и первоначальной схемы выполните гидравлический расчет.

Сравните результаты своих расчетов с указанными в строке 5 сводной таблицы (см. п. 5.3.4). Обратите внимание, что проведенные упрощения мало отразились на гидравлических параметрах схемы.

Следующий шаг – удаление тупиков. Некоторые тупиковые ветви содержала исходная модель, другие появились в ходе предыдущих шагов упрощения.

Восстановите окно *Skeletonizer*, установите курсор на пункт *Удаление тупиков* и нажмите кнопку *Создать*. Задайте параметр *Максимальное количество уровней усечения* равным 10. Остальные параметры оставьте без изменений (рис. 5.22).

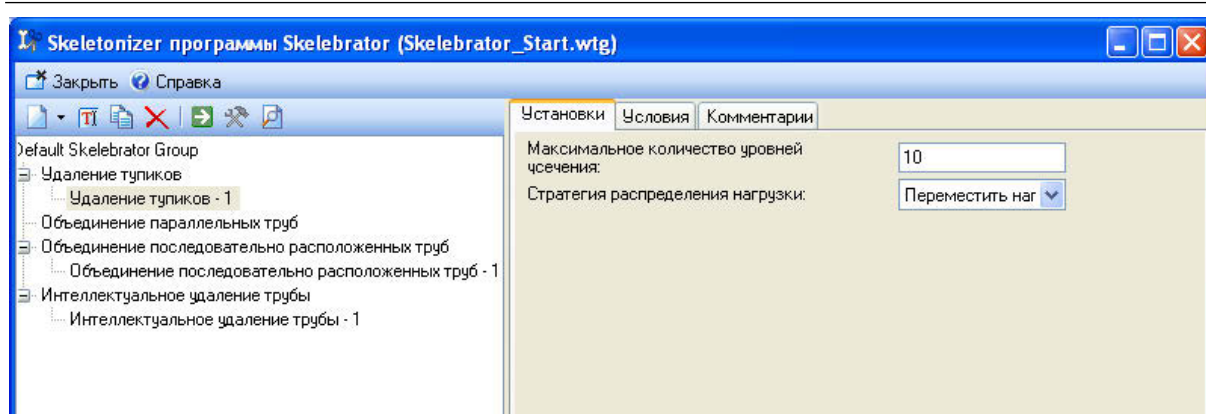


Рис. 5.22. Параметры удаления тупиков

При желании вы можете познакомиться с предполагаемыми изменениями схемы (кнопка *Предварительный просмотр*).

Выполните автоматический расчет (рис. 5.23). Сравните результаты своих расчетов с указанными в строке 6 сводной таблицы (см. п. 5.3.4).

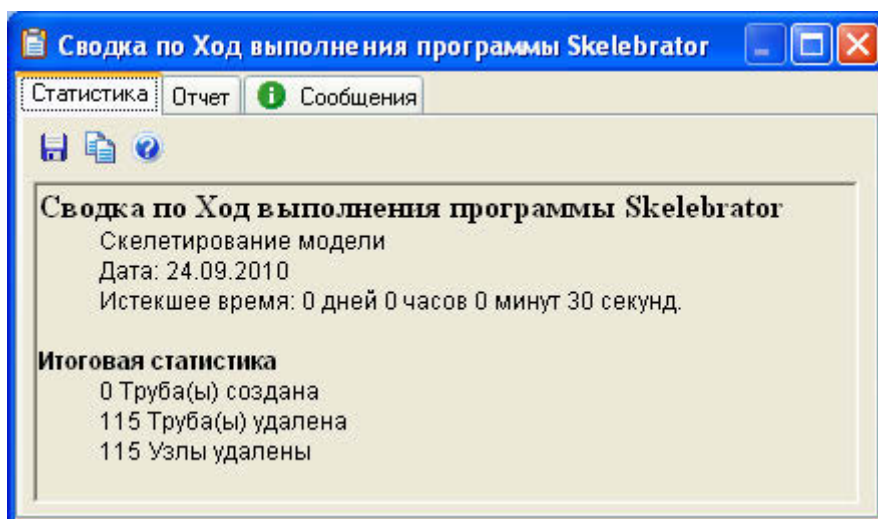


Рис. 5.23. Результаты удаления тупиков

После удаления тупиков обычно образуются новые последовательные трубопроводы, которые целесообразно объединить.

Восстановите окно *Skeletonizer* и установите курсор на пункт *Объединение последовательно расположенных труб – 1*. Выполните автоматический расчет без изменения каких-либо параметров.

Минимизируйте окно *Skeletonizer* и выполните гидравлический расчет. Сравните результаты своих расчетов с указанными в строке 7 сводной таблицы (см. п. 5.3.4).

В результате проведенных операций на схеме образовались параллельно соединенные трубопроводы, которые целесообразно удалить, заменив их эквивалентными.

Восстановите окно *Skeletonizer* и установите курсор на пункт *Объединение параллельных труб*. Задайте параметры объединения в соответствии с рис. 5.24.

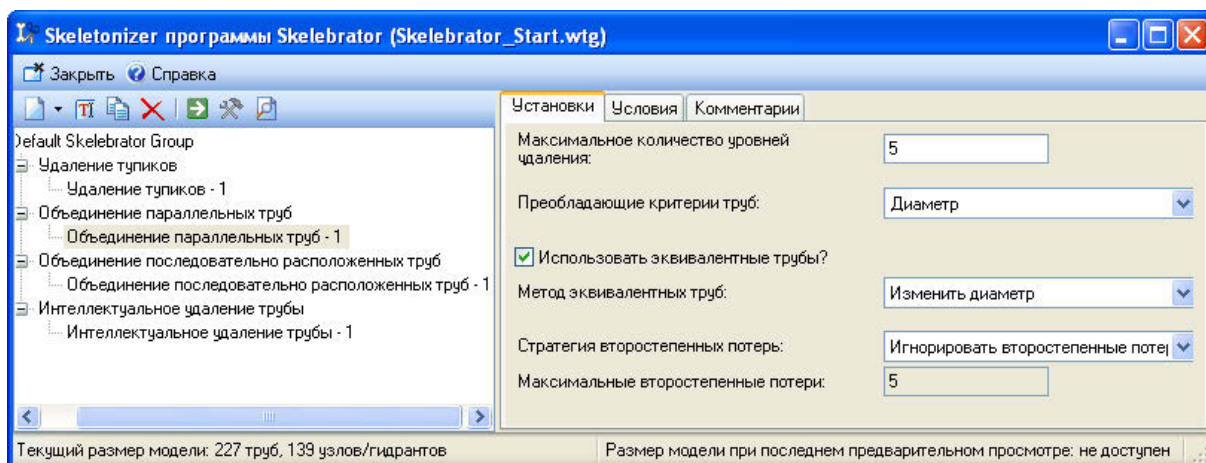



Рис. 5.24. Параметры объединения параллельных участков

Нажмите кнопку  – *Предварительный просмотр*. После завершения вычислений минимизируйте окно *Skeletonizer*. Объединяемые участки будут выделены на схеме (рис. 5.25).

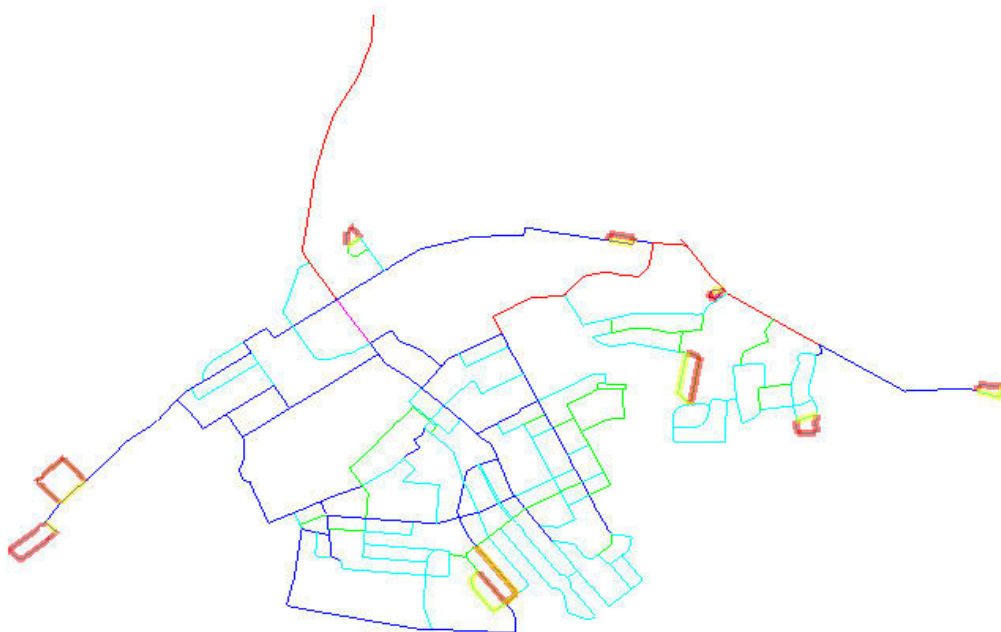


Рис. 5.25. Предварительный просмотр объединяемых параллельных участков

Восстановите окно *Skeletonizer* и установите курсор на пункт *Объединение параллельных труб – 1*. Выполните автоматический расчет. Сравните результаты своих расчетов с указанными в строке 8 сводной таблицы (см. п. 5.3.4).

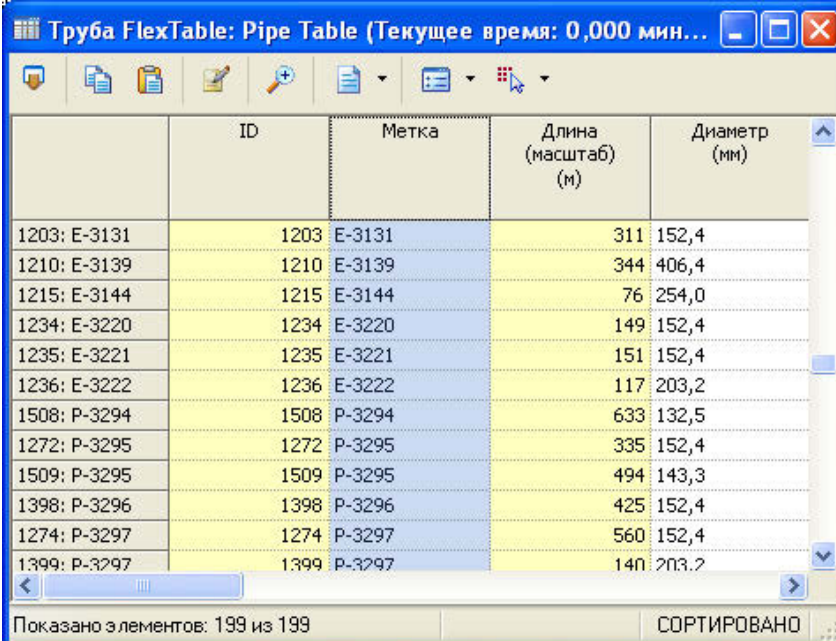
Изучив схему после этого шага упрощения, вы обнаружите, что на ней снова образовались несколько тупиков. Предлагаем вам самостоятельно выполнить их удаление и выполнить гидравлический расчет. Сравните полученные результаты с указанными в строке 9 сводной таблицы.

Как вы уже знаете, удаление тупиков приводит к образованию последовательно соединенных участков. Предлагаем вам самостоятельно выполнить их объединение.

Выполните гидравлический расчет сети и сравните его результаты с указанными в строке 10 сводной таблицы.

На этом мы завершим упрощение сети. Нам удалось уменьшить количество труб более, чем в три раза практически без изменения гидравлических параметров сети в обоих сценариях.

Для более детального знакомства с результатами работы программы рекомендуем открыть таблицу *Труба*. В ней эквивалентные трубопроводы, созданные на различных этапах упрощения схемы, имеют метку Р-... . В общем случае их диаметры могут отличаться от стандартных (рис. 5.26).



	ID	Метка	Длина (масштаб) (м)	Диаметр (мм)
1203: E-3131	1203	E-3131	311	152,4
1210: E-3139	1210	E-3139	344	406,4
1215: E-3144	1215	E-3144	76	254,0
1234: E-3220	1234	E-3220	149	152,4
1235: E-3221	1235	E-3221	151	152,4
1236: E-3222	1236	E-3222	117	203,2
1508: P-3294	1508	P-3294	633	132,5
1272: P-3295	1272	P-3295	335	152,4
1509: P-3295	1509	P-3295	494	143,3
1398: P-3296	1398	P-3296	425	152,4
1274: P-3297	1274	P-3297	560	152,4
1399: P-3297	1399	P-3297	140	203,2

Показано элементов: 199 из 199

СОРТИРОВАНО

Рис. 5.26. Результаты упрощения схемы

### 5.3.4. Результаты упрощения схемы

Таблица 5.1

Результаты упрощения схемы на различных этапах работы

№	Вид упрощения	Всего труб	Всего узлов	Напор в узле А-100, м		Напор по характеристике сети, м	
				Сценарий <i>Базовый</i>	Сценарий <i>Пожар в А-100</i>	$Q = 0$ , л/с	$Q = 150$ , л/с
1	Исходная схема	656	517	29,7	21,9	48,4	63,9
2	Удаление труб $d < 6$ in	504	451	29,7	12,4	47,3	63,6
3	Удаление труб $d \leq 8$ in	353	329	29,7	12,4	47,4	75,3
4	Объед. послед. уч-ков	531	392	29,7	21,9	48,4	63,9
5	Удаление труб $d \leq 4$ in	453	365	29,7	21,3	48,4	64,0
6	Удаление тупиков	338	250	29,8	21,3	48,6	64,6
7	Объед. послед. уч-ков	227	139	29,8	21,5	48,6	64,4
8	Объед. парал. уч-ков	216	139	29,8	21,5	48,6	64,4
9	Удаление тупиков	209	132	29,8	21,5	48,6	64,6
10	Объед. послед. уч-ков	199	122	29,8	21,5	48,6	64,8



---

## 6. Расчет узловых отборов

### 6.1. Способы учета водопотребления

Количество воды, потребляемое абонентами сети (населением, предприятиями и т. д.), является наиболее важным параметром ее модели. От качества (точности) его определения во многом зависит и качество всей модели сети водоснабжения.

Потребление воды постоянно изменяется во времени. Если мы хотим добиться построения модели, наиболее адекватной реальной сети, необходимо как можно более часто контролировать количество воды, потребляемое абонентами, и корректировать модель.

Наиболее достоверные сведения о водопотреблении могут быть получены только путем непосредственных измерений. С этой целью у потребителей устанавливаются счетчики (рис. 6.1.). Показания счетчиков снимаются с некоторой периодичностью (обычно не чаще одного раза в месяц).



*Рис. 6.1. Абонентский счетчик (водомер)*

До недавнего времени они использовались чаще всего лишь с целью подготовки счетов на оплату услуг предприятий «Водоканал». Во многих предприятиях «Водоканал» службы, ведающие учетом потребления воды, организационно отделены от «технических» подразделений, и поэтому могут возникнуть проблемы с получением данных для построения модели сети.

Заметим, что за рубежом операции по учету водопотребления и подготовке соответствующих счетов называют биллингом (billing).

---

Естественно, что этот термин используется и в программах для моделирования сетей и обычно дается без перевода.

К сожалению, далеко не всегда учет водопотребления ведется на основе объективных данных. Многие абоненты сети либо вообще не имеют индивидуальных счетчиков, либо один счетчик используется для некоторой группы абонентов.

В сетях (или в их частях), где средства учета отсутствуют, водопотребление оценивают по нормативам. Все предприятия «Водоканал» ведут учет количества воды, забираемой из различных источников, поскольку они должны платить соответствующий государственный налог. Таким образом, этот объем воды просто распределяется между абонентами по той или иной методике.

Очевидно, что такой подход отражает реальную ситуацию очень приблизительно. Как минимум, он не учитывает утечки воды, величина которых может составлять значительную долю общего водопотребления. Утечки далеко не всегда связаны с прорывами трубопроводов, неисправностью измерительных приборов или с другими техническими причинами. К сожалению, в сетях часто имеют место несанкционированные отборы воды, т. е. существуют потребители, которые ее просто крадут. Программы для моделирования сетей имеют средства для «вычисления» таких потребителей, но их эффективное применение возможно лишь при наличии надежных данных о водопотреблении других абонентов.

В настоящее время точному учету водопотребления уделяется все большее внимание. Постоянный учет позволяет потребителям добиваться существенной экономии воды. С другой стороны, наличие средств индивидуального учета вынуждает предприятия «Водоканал» больше внимания уделять поиску и ликвидации утечек.

## **6.2. Методы расчета узловых отборов**

Каждый потребитель получает воду из индивидуального тупикового трубопровода относительно небольшого диаметра. Такие трубопроводы обычно исключаются из схемы сети при построении ее модели. Таким образом, связь между схемой и потребителями разрывается и возникает проблема определения узловых отборов, необходимых для расчета.



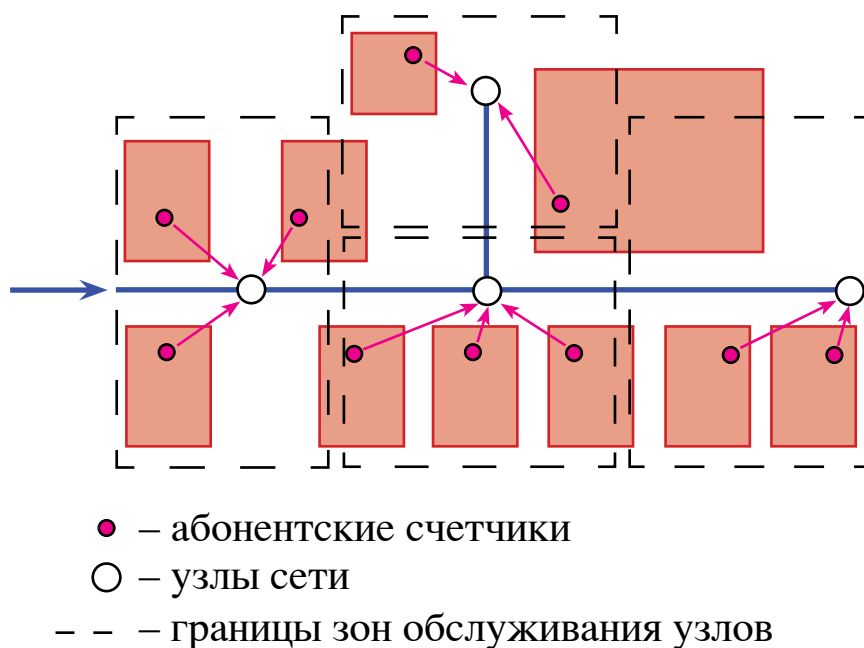
Применяют несколько методов ее решения. Выбор конкретного метода зависит, в том числе, и от того, имеются ли данные о водопотреблении абонентов или же расчет проводится по нормативам.

Сначала рассмотрим методы расчета узловых отборов при наличии данных о водопотреблении абонентов.

### *Метод совокупного отбора*

Суть метода заключается в том, что каждому узлу сети, исходя из каких-либо априорных соображений, назначается так называемая зона обслуживания (рис. 6.2). При этом каждый абонент может находиться в границах лишь какой-то одной зоны.

Зона обслуживания каждого узла задается на основе опыта эксплуатации сети вручную или путем специальных расчетов (например, методом многоугольников Тиссена, который рассматривается далее). Расчетный отбор в узле определяется как сумма показаний всех абонентских счетчиков его зоны обслуживания.

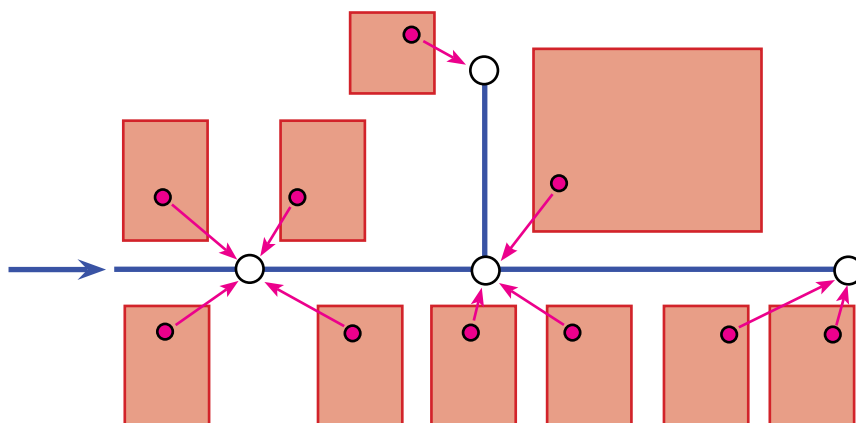


*Рис. 6.2. Метод совокупного отбора*

---

### *Метод ближайшего узла*

По данной методике каждый абонентский счетчик ставят в соответствие («привязывают») ближайшему узлу сети (рис. 6.3). Расчетный отбор в узле определяется как сумма показаний его абонентских счетчиков.

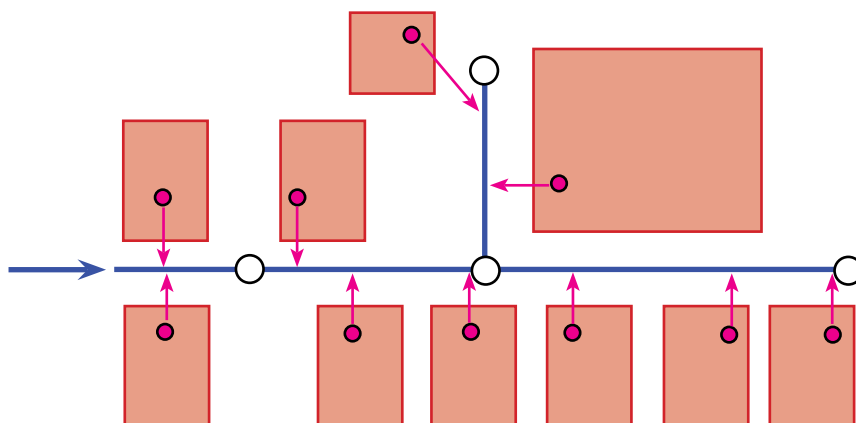


*Рис. 6.3. Метод ближайшего узла*

### *Метод ближайшей трубы*

При таком подходе каждый абонентский счетчик ставят в соответствие ближайшему трубопроводу сети (рис. 6.4). Далее показания каждого счетчика делят между узлами трубы тем или иным способом.

Это деление можно осуществлять, например, пропорционально расстоянию от счетчика до узла, а в простейшем случае – пополам.



*Рис. 6.4. Метод ближайшей трубы*

Узловой отбор определяется суммированием показаний счетчиков, отнесенных к данному узлу, со всех труб, сходящихся в нем.

Следующая группа методов применяется в тех случаях, когда отсутствуют данные о водопотреблении абонентов, но известно количество воды, подаваемой в сеть.

### *Равномерное распределение подачи*

Это наиболее простой способ расчета узловых отборов. Все узловые отборы в этом случае одинаковые и определяются путем деления общего объема воды, подаваемой в сеть, на число узлов (рис. 6.5).

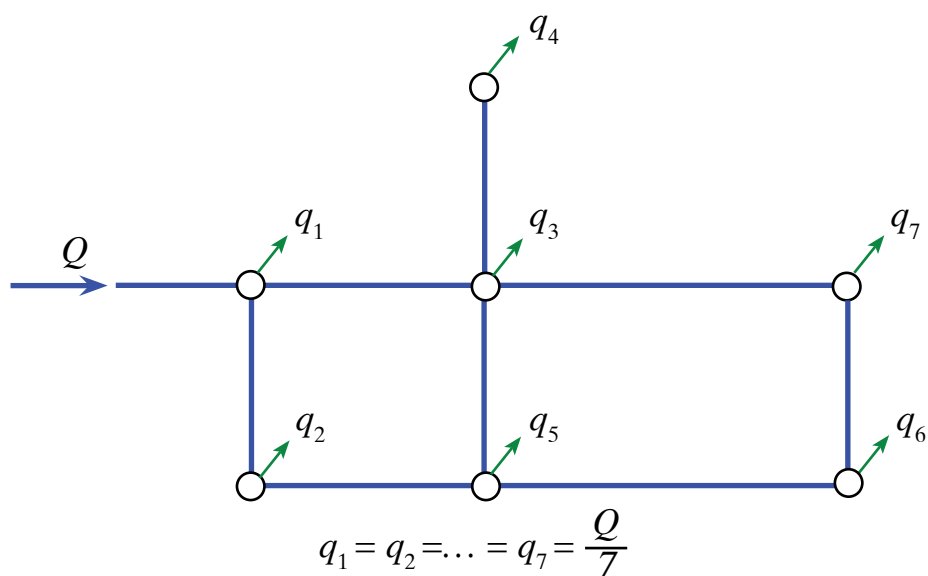


Рис. 6.5. Равномерное распределение

### *Распределение подачи пропорционально площадям*

Согласно этой методике сначала следует назначить зоны обслуживания всех узлов сети. Узловые отборы рассчитываются пропорционально площадям их зон обслуживания  $S_i$  (рис. 6.6).

Если  $S_\Sigma$  – общая площадь зоны водоснабжения, а  $Q$  – подача воды в сеть, то узловые отборы:

$$q_i = S_i \frac{Q}{S_\Sigma} .$$

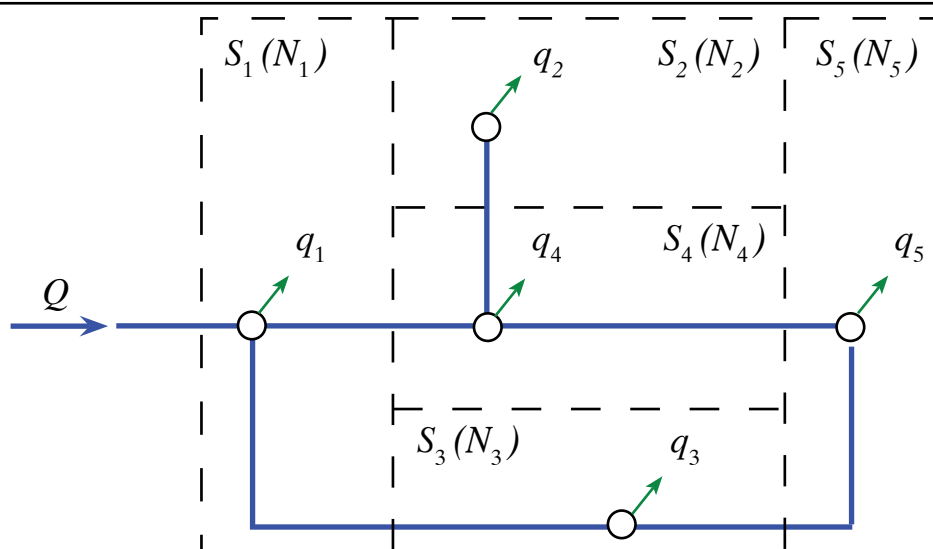


Рис. 6.6. Пропорциональное распределение

### *Распределение подачи пропорционально численности населения*

Как и в предыдущем случае, сначала назначают зоны обслуживания всех узлов сети и определяют численность населения  $N_i$  в каждой из них.

Если  $N_\Sigma$  – общая численность населения, то узловые отборы (см. рис. 6.6)

$$q_i = N_i \frac{Q}{N_\Sigma} .$$

При проектировании сетей водоснабжения отборы определяют по нормативам с учетом характера использования воды (хозяйственно-питьевые нужды, потребности промышленных предприятий и т. п.) в каждой зоне обслуживания. При этом руководствуются требованиями СНиП, нормами пожарной безопасности и т. п.

### **6.3. Определение границ зон обслуживания узлов**

Для применения некоторых методов расчета узловых отборов сначала требуется определить (назначить) зоны обслуживания всех узлов. Конечно, их можно назначить вручную, исходя из опыта эксплуатации сети или экспертных оценок.

При совместном использовании программ для моделирования сетей и геоинформационных систем процесс создания зон обслуживания может быть автоматизирован.

При планировании бизнес-процессов, создании тех или иных систем массового обслуживания (например, торговли), транспортных сетей и т. п. широко используются многоугольники Тиссена.

Пусть на плане зоны водоснабжения, построенном в масштабе, имеется несколько узловых точек сети (рис. 6.7). Требуется разделить (разрезать) план зоны на отдельные части по числу узлов. Конфигурация каждой части должна быть такой, чтобы расстояние от любой ее точки до соответствующего ей узла было не более, чем до любого другого узла.

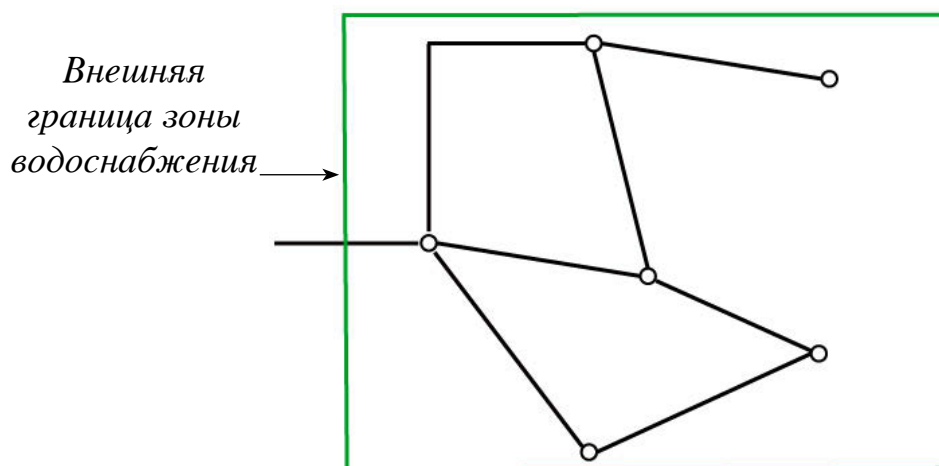


Рис. 6.7. Исходный план зоны водоснабжения

Каждая такая часть плана имеет форму многоугольника, в центре которого находится один узел (за исключением тех частей, которые находятся на границах плана). Стороны многоугольника перпендикулярны линиям, которые соединяют данный узел с соседними узлами и делят эти линии пополам.

Последовательность построения многоугольников Тиссена вручную для простого плана иллюстрируется следующими рисунками. Исходный план сети показан на рис. 6.7.

С помощью циркуля и линейки построим перпендикуляры, проходящие через центры линий, соединяющих каждый узел с соседними узлами (рис. 6.8). Эти перпендикуляры совместно с границами плана как раз и образуют многоугольники Тиссена (рис. 6.9).

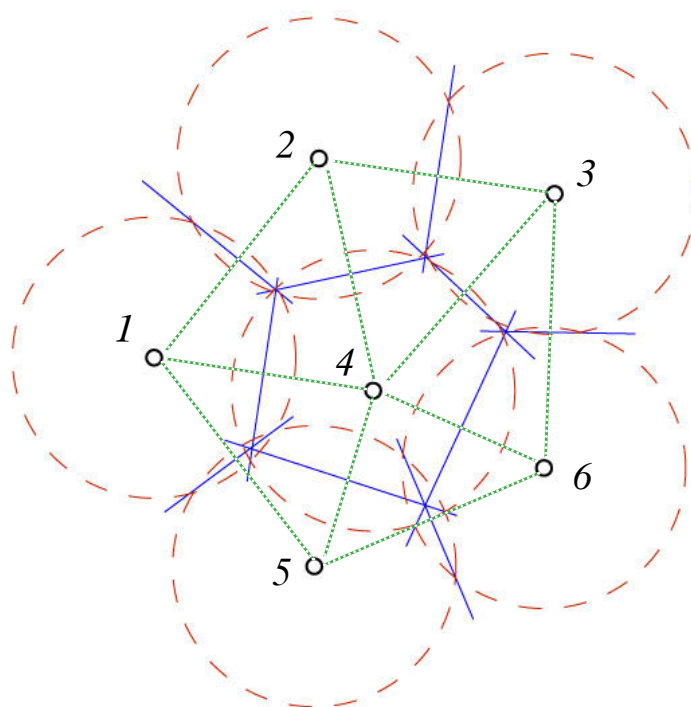


Рис. 6.8. Построение многоугольников Тиссена

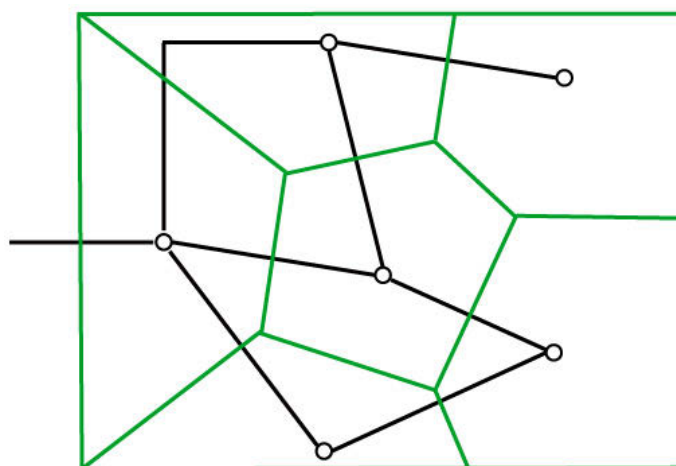


Рис. 6.9. Зоны обслуживания узлов на плане сети

#### 6.4. Расчет узловых отборов в среде WaterGEMS

Для расчета узловых отборов используется специальный инструмент LoadBuilder. Исходные данные, необходимые для его работы, должны быть представлены в виде шейп-файлов ГИС.

---

При отсутствии ГИС шейп-файлы можно подготовить средствами WaterGEMS.

Сначала на простом примере рассмотрим принципы использования LoadBuilder, а далее его возможности будут продемонстрированы на примере достаточно большой сети.

#### 6.4.1. Предварительные действия. Шейп-файл

Создайте новый проект и откройте файл *Lesson1.dxf* в качестве фонового слоя. Для удобства дальнейших расчетов и лучшего понимания методики определения узловых отборов разместите на схеме сети всего четыре узла, которые далее будут имитировать потребителей сети. Расположите их на схеме приблизительно так, как показано на примере (рис. 6.10).

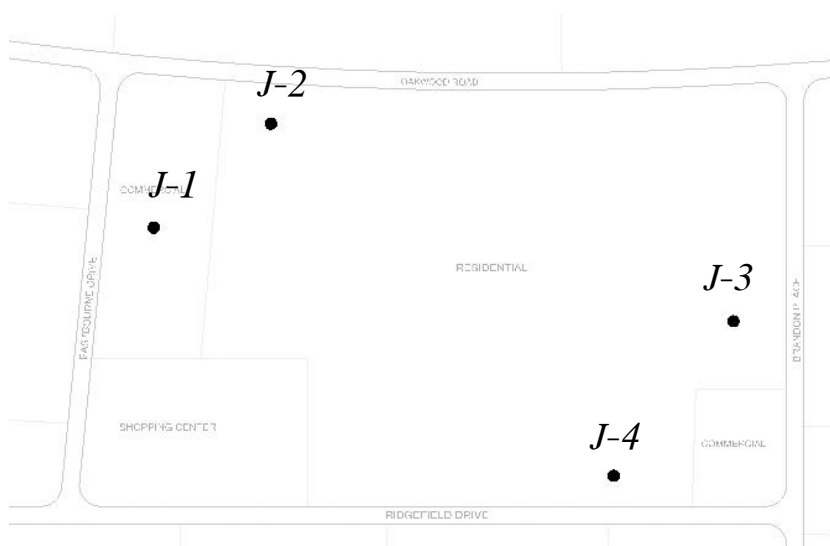


Рис. 6.10. Водомеры на плане зоны водоснабжения

Если изображения узлов и их обозначения слишком мелкие, то откройте пункт меню **Инструменты – Опции** и на вкладке *Схема* измените значения множителей размеров символов и текста (рис. 6.11).

Для ввода и хранения показаний водомеров создадим новый атрибут (поле) узла. Для этого активизируйте пункт меню **Инструменты – Расширения данных пользователя**. Используя контекстное меню, создайте атрибут *Водомер* (рис. 6.12).

Теперь это поле появится в окне свойств узла. Введите во всех узлах одинаковые значения показаний водомера 4 л/с (рис. 6.13).



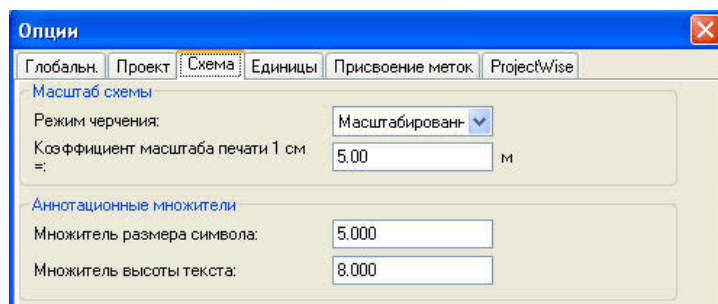


Рис. 6.11. Изменение масштаба отображения символов

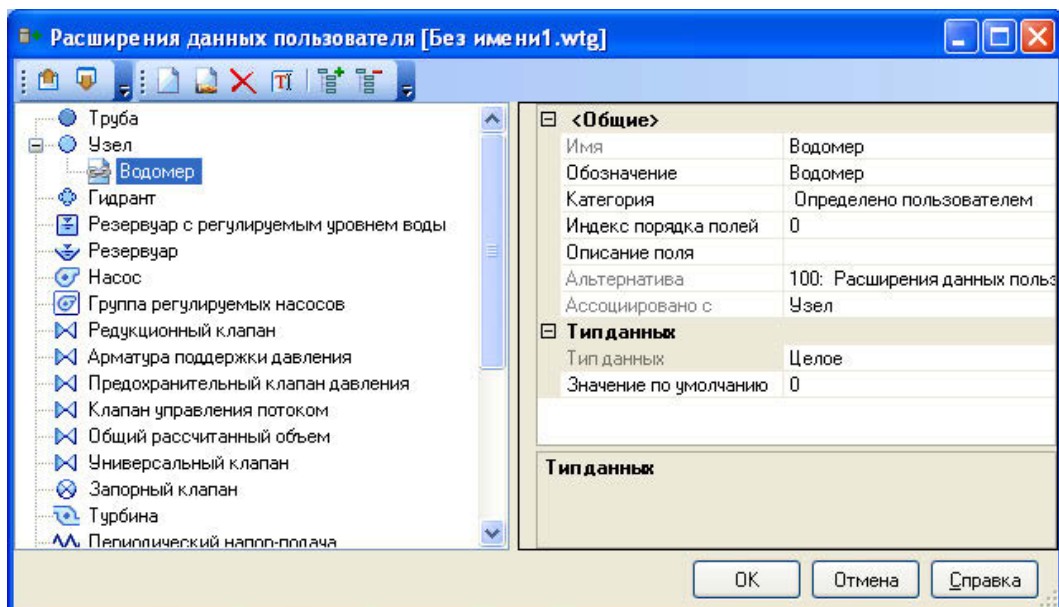


Рис. 6.12. Создание нового атрибута

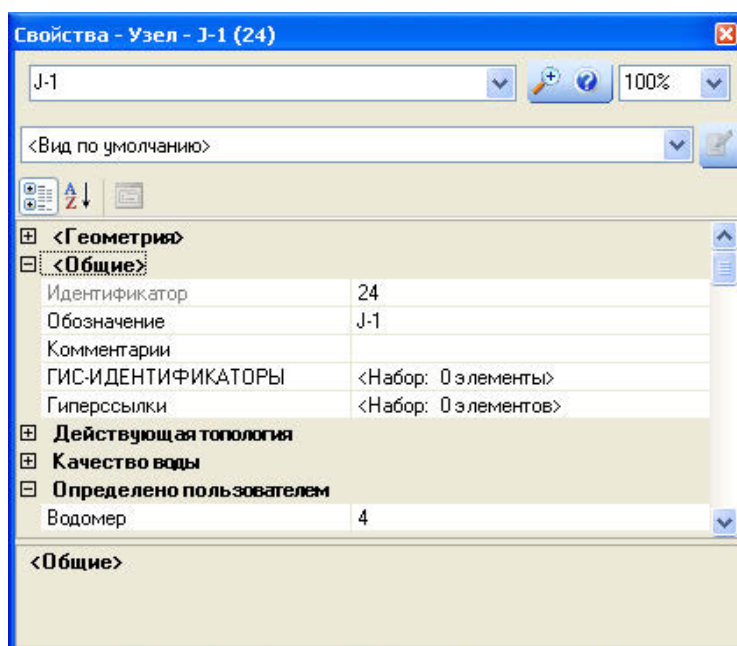
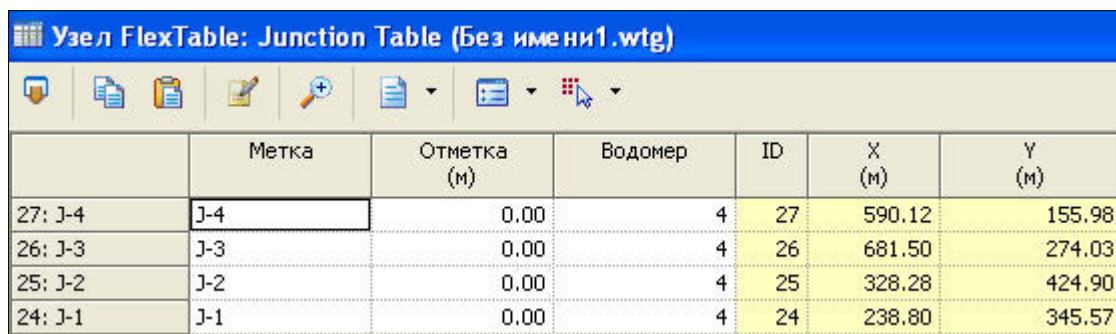



Рис. 6.13. Ввод показания водомера

Откройте таблицу *Узел*. С помощью инструмента *Редактирование* приведите ее к виду, показанному на рис. 6.14. Обратите внимание, что наименования столбцов могут не совпадать с вашими. Минимальный набор отображаемых атрибутов должен включать идентификатор узла, его координаты X, Y и показания водомера.



	Метка	Отметка (м)	Водомер	ID	X (м)	Y (м)
27: J-4	J-4	0.00	4	27	590.12	155.98
26: J-3	J-3	0.00	4	26	681.50	274.03
25: J-2	J-2	0.00	4	25	328.28	424.90
24: J-1	J-1	0.00	4	24	238.80	345.57

Рис. 6.14. Таблица узлов перед импортом в шейп-файл

Нажмите кнопку  – *Экспорт в файл* меню таблицы. Далее следуйте указаниям программы. Сначала задайте имя файла, убедитесь, что его расширение *shp*, т. е. будет создан шейп-файл ГИС (рис. 6.15).

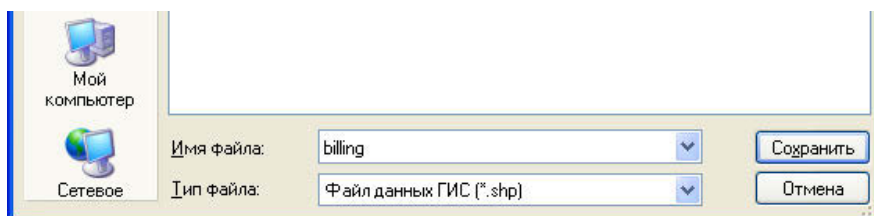


Рис. 6.15. Присвоение имени шейп-файлу

В окне редактора имен полей файла ГИС введите желаемые имена атрибутов, однако использовать символы кириллицы не рекомендуется (рис. 6.16).

После создания шейп-файла проект можно закрыть. Больше он вам не понадобится.

Теперь с помощью *Проводника Windows* откройте папку, в которой вы сохранили шейп-файл. Обратите внимание, что программа создала не один, а три файла с одинаковыми именами, но с разными расширениями: *dbf*, *shp* и *shx*. Для нас интерес представляет лишь *dbf*-файл. Такое расширение имеют файлы системы управления базами данных (СУБД) dBase. Этот формат очень часто используется для

---

обмена данными между различными СУБД. С ними может работать и программа MS Excel, которую мы и предлагаем вам запустить.

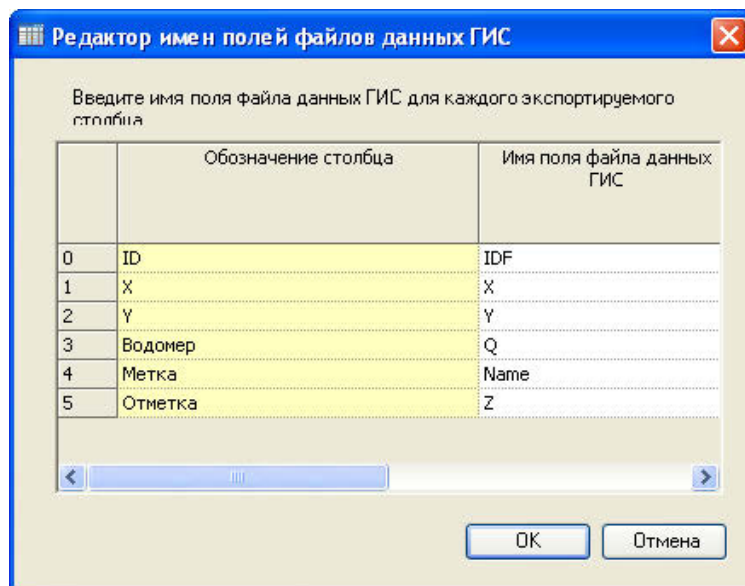


Рис. 6.16. Редактор имен полей шейп-файла

Откройте с помощью MS Excel *dbf*-файл, созданный WaterGEMS (рис. 6.17), и убедитесь, что он содержит экспортированные атрибуты узлов (рис. 6.18).

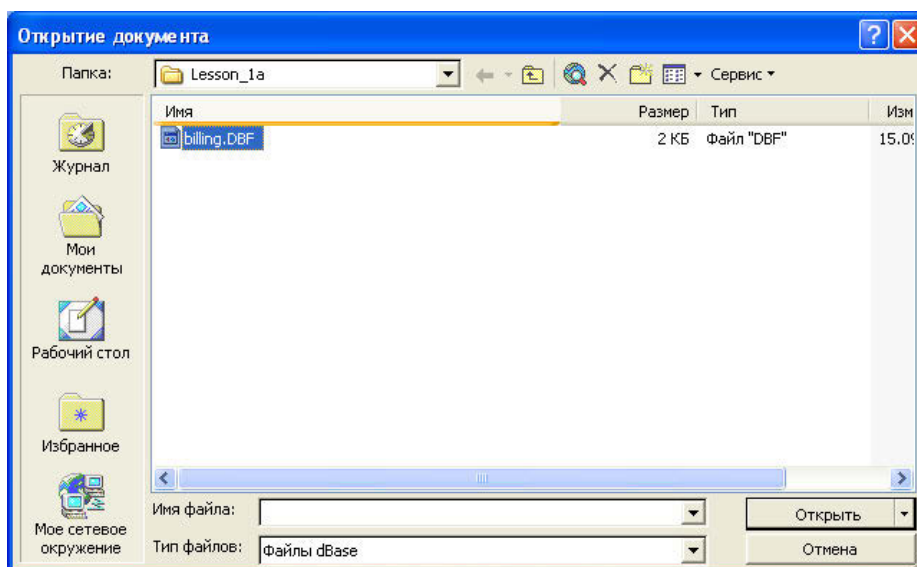


Рис. 6.17. Открытие *dbf*-файла с помощью MS Excel

При необходимости именно Excel позволит вам изменить показания водомеров. Добавлять или удалять строки таблицы, менять

наименования столбцов нельзя, поскольку это нарушит целостность шейп-файла.

	A	B	C	D	E	F
1	IDF	X	Y	Q	NAME	Z
2	27	590.120000000000	155.980000000000	4	J-4	0.000000000000
3	26	681.500000000000	274.030000000000	4	J-3	0.000000000000
4	25	328.280000000000	424.900000000000	4	J-2	0.000000000000
5	24	238.800000000000	345.570000000000	4	J-1	0.000000000000
6						
7						

Рис. 6.18. Dbf-файл в виде таблицы MS Excel

Теперь с помощью WaterGEMS создайте новый проект. При этом используйте тот же фоновый слой. В данном случае достаточно нарисовать очень простую схему сети, показанную на рис. 6.19. С ее помощью мы рассмотрим несколько способов расчета узловых отборов по показаниям водометров. В качестве второго фонового слоя откройте созданный ранее шейп-файл. Водометры появятся на схеме.

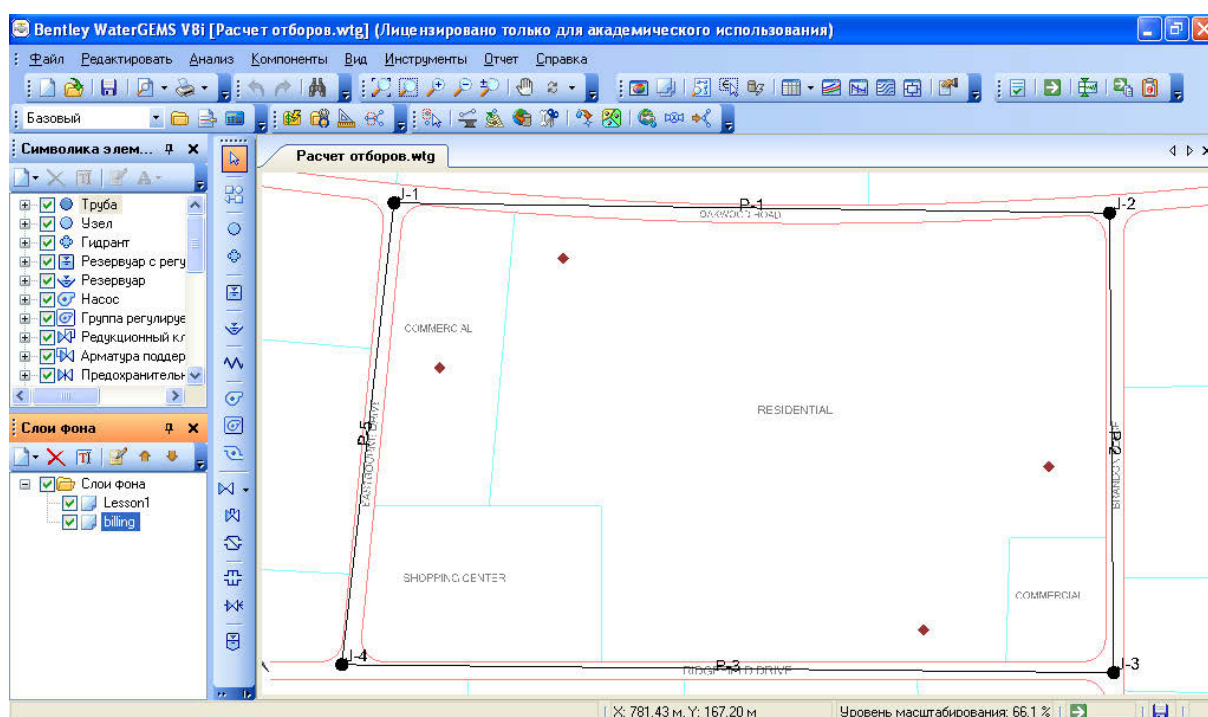




Рис. 6.19. Схема сети

---

На данном этапе работы мы не будем выполнять гидравлический расчет сети, поэтому параметры узлов и труб принимаются по умолчанию.

#### 6.4.2. Принципы использования LoadBuilder

Запустите LoadBuilder с помощью пункта меню **Инструменты – LoadBuilder** или кнопкой . В окне LoadBuilder нажмите кнопку  – **Создать** (рис. 6.20). Откроется окно для выбора метода расчета.

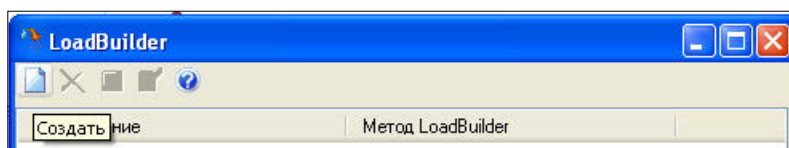


Рис. 6.20. Стартовое окно LoadBuilder

Сначала рассмотрим метод ближайшего узла (рис. 6.21).



Рис. 6.21. Метод ближайшего узла

Задайте параметры, показанные на нашем примере (рис. 6.22).

На следующем шаге программа подсчитает суммарный объем водопотребления по показаниям водомеров. При необходимости можно ввести так называемый глобальный множитель. С его помощью учитывают тот факт, что вследствие неизбежных утечек расход воды, подаваемой в сеть, всегда больше суммарного водопотребления, зафиксированного водомерами потребителей (рис. 6.23). После перехода к следующему шагу вы увидите, что программа распределила суммарное водопотребление между двумя узлами J-1 и J-3 (рис. 6.24).



**Мастер LoadBuilder**

**Итоги расчета**  
Назначить график для каждого типа нагрузки.

Тип нагрузки	Потребление (л/с)	Множитель	График
По умолчанию	16	1.000	Фиксированный

Глобальный множитель:

Общая нагрузка:  л/с

Отмена Справка < Назад Вперед > Завершение

Рис. 6.22. Параметры импорта нагрузок

**Мастер LoadBuilder**

**Итоги расчета**  
Назначить график для каждого типа нагрузки.

Тип нагрузки	Потребление (л/с)	Множитель	График
По умолчанию	16	1.000	Фиксированный

Глобальный множитель:

Общая нагрузка:  л/с

Отмена Справка < Назад Вперед > Завершение

Рис. 6.23. Общий объем водопотребления

**Мастер LoadBuilder**

**Просмотр результатов**  
Список расчетных нагрузок для каждого узла.

Идентификатор узла	Потребление (л/с)	Тип нагрузки	График
27: J-3	8	По умолчанию	Фиксированный
24: J-1	8	По умолчанию	Фиксированный

Отмена Справка < Назад Вперед > Завершение

Рис. 6.24. Распределение нагрузок между узлами

На последнем шаге заполните произвольным образом поле *Обозначение* и укажите, что необходимо создать новую альтернативу потребления (рис. 6.25).

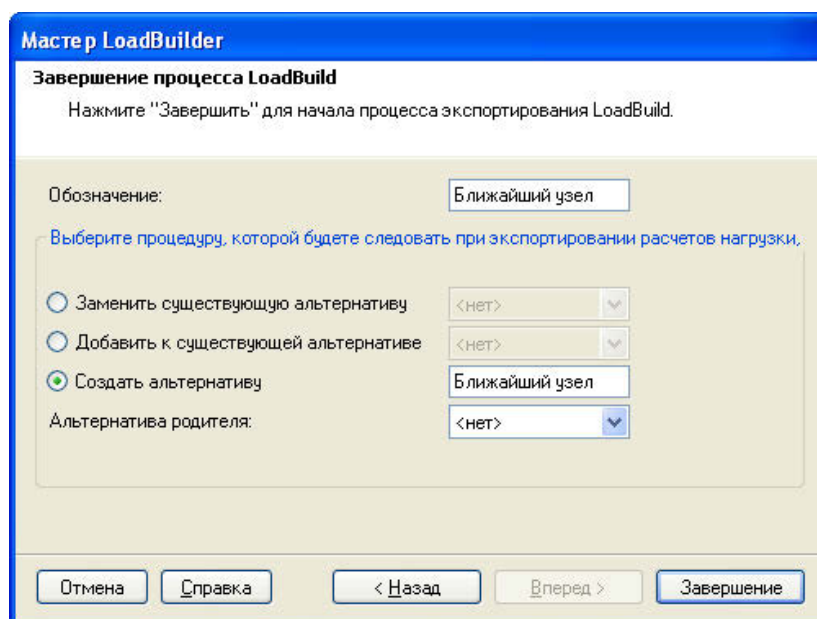


Рис. 6.25. Параметры создаваемой альтернативы

LoadBuilder завершает свою работу выводом общих итогов.

Закройте LoadBuilder и откройте окно свойств какого-либо узла. Обратите внимание, что рассчитанные отборы узлам еще не назначены.

Создайте новый сценарий, двойным щелчком откройте окно его свойств и задайте альтернативу потребления (рис. 6.26).

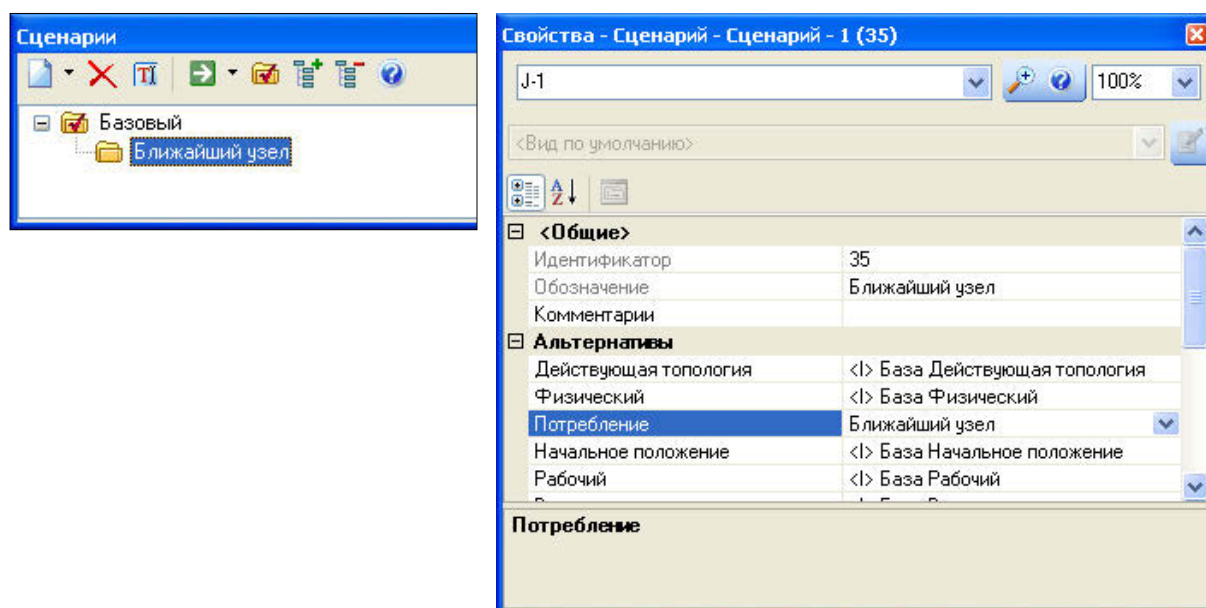


Рис. 6.26. Новый сценарий и его свойства



Установив созданный сценарий в качестве текущего вы сможете убедиться, что рассчитанные нагрузки теперь назначены соответствующим узлам (рис. 6.27).

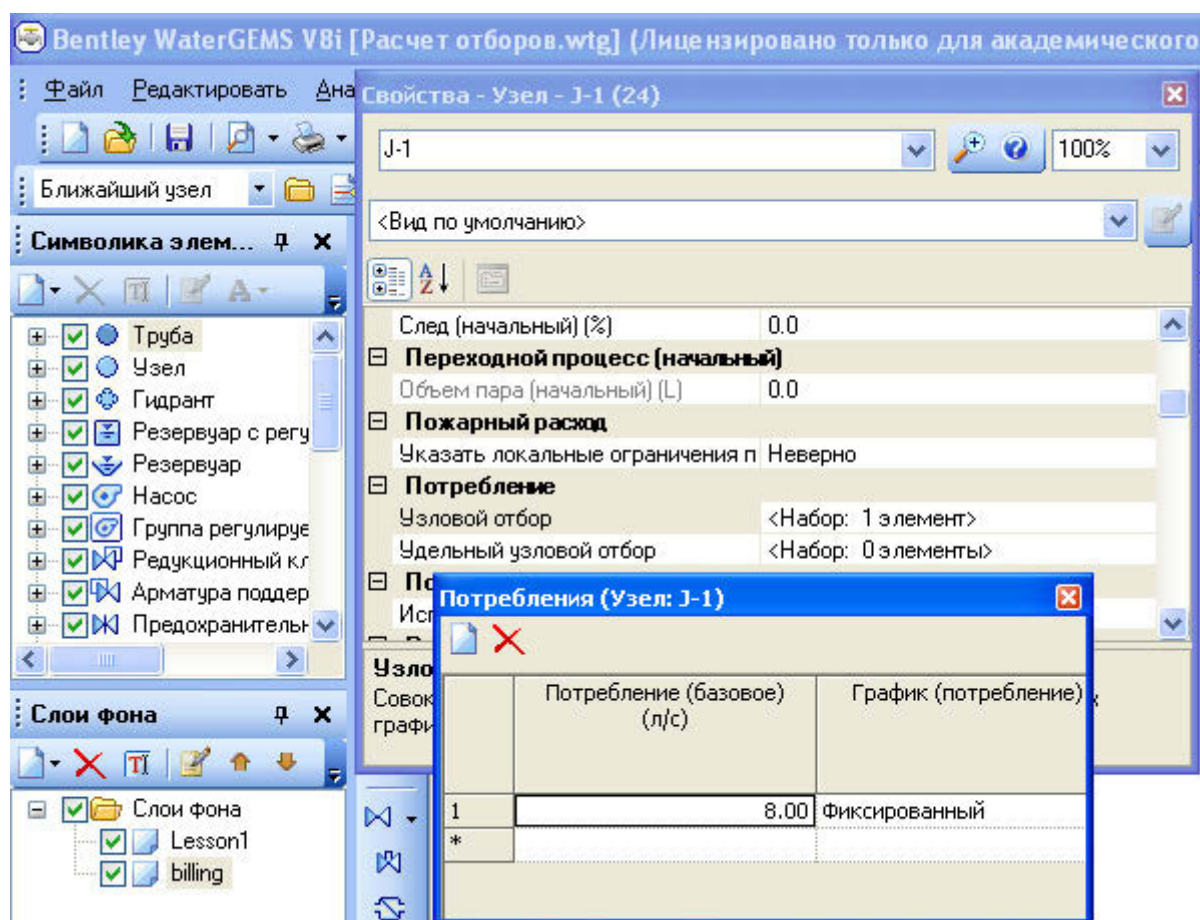


Рис. 6.27. Просмотр значений узловых отборов

Теперь рассмотрим расчет узловых отборов методом ближайшей трубы. Для этого вновь запустите LoadBuilder и укажите требуемый метод (рис. 6.28).

На втором шаге работы LoadBuilder введите параметры, указанные на нашем примере (рис. 6.29). Сначала рассмотрим равное распределение, когда показание каждого водо-

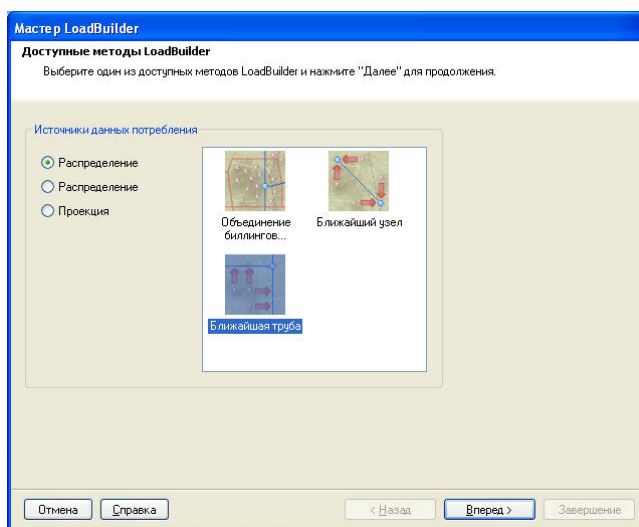


Рис. 6.28. Расчет отборов методом ближайшей трубы

мера делится пополам между начальным и конечным узлами ближайшей трубы. При этом вы увидите, что программа распределила всю нагрузку равномерно по всем узлам.

**Мастер LoadBuilder**

**Ближайшая труба**  
Ближайшая труба

**Данные труб модели:**

Слой трубы: Труба\Все элементы

Поле идентификатора трч: ElementID

Назначения нагрузки: Равное распределение

**Слой узла модели**

Слой узла: Узел\Все элементы

Поле идентификатора цзл: ElementID

Использовать предыдущий запуск: ☐

**Данные биллингового счетчика**

Слой биллингового счетчика: D:\Betley\Lesson\_1a\billing.shp

Поле типа нагрузки: <нет>

Поле идентификатора бил: Q

Распределение полилинии: Равное распределение

Поле использования: Q л/с

Отмена Справка < Назад Вперед > Завершение

**Мастер LoadBuilder**

**Просмотр результатов**  
Список расчетных нагрузок для каждого узла.

	Идентификатор узла	Потребление (л/с)	Тип нагрузки	График
	29: J-4	4	По умолчанию	Фиксированный
	27: J-3	4	По умолчанию	Фиксированный
	25: J-2	4	По умолчанию	Фиксированный
	24: J-1	4	По умолчанию	Фиксированный

Отмена Справка < Назад Вперед > Завершение

Рис. 6.29. Равномерное распределение нагрузки

Используя кнопку *Назад*, вернитесь к окну, где задавался способ распределения нагрузки по длине трубы. Укажите, что теперь оно должно быть пропорциональным (рис. 6.30).

Теперь программа назначила отборы во всех четырех узлах, но в узлах J-1 и J-3 несколько больше, чем в двух других, поскольку при расчетах учитывались расстояния от водомеров до узлов.

**Мастер LoadBuilder**

**Ближайшая труба**  
Ближайшая труба

Данные труб модели:

Слой трубы: Труба\Все элементы ...

Поле идентификатора трч: ElementID

Назначение нагрузки: Взвешенное расстояние

Слой узла модели

Слой узла: Узел\Все элементы ...

Поле идентификатора цзл: ElementID

Использовать предыдущий запуск: ☐

Данные биллингового счетчика

Слой биллингового счетчика: D:\Betley\Lesson\_1a\billing.shp ...

Поле типа нагрузки: <нет>

Поле идентификатора бил: Q

Распределение полилинии: Пропорциональное распреде

Поле использования: Q л/с

Отмена Справка < Назад Вперед > Завершение

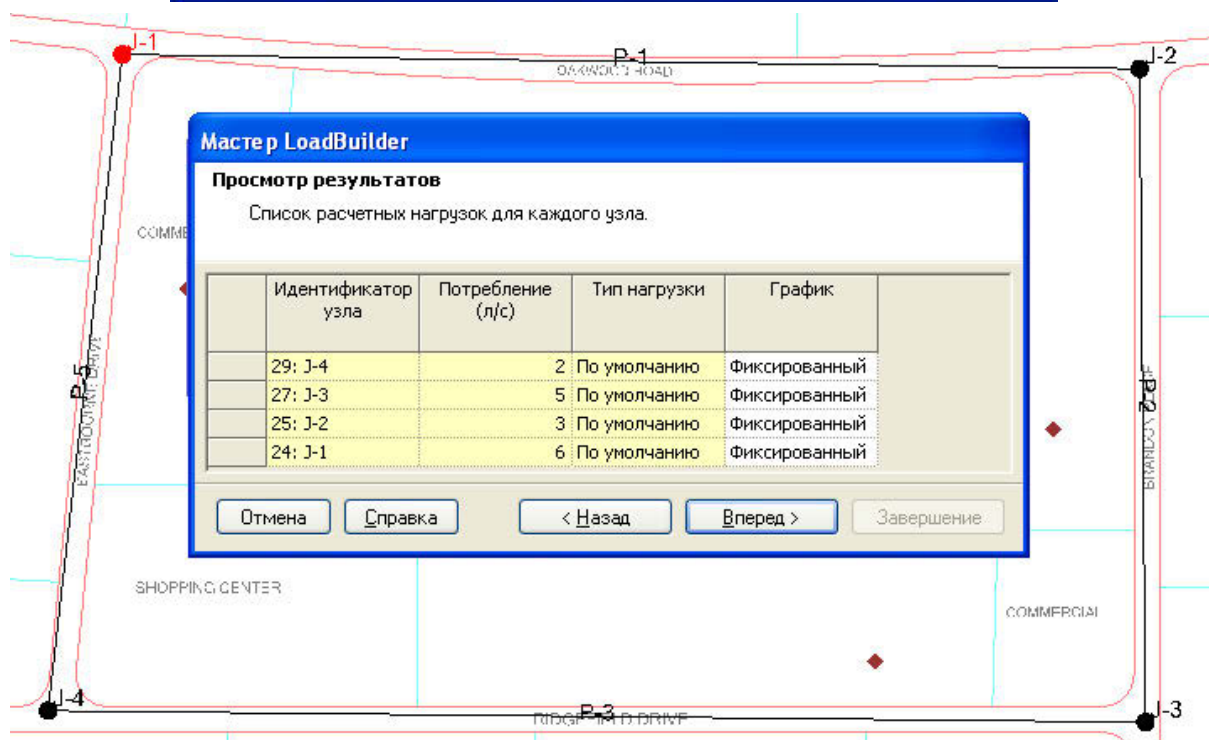



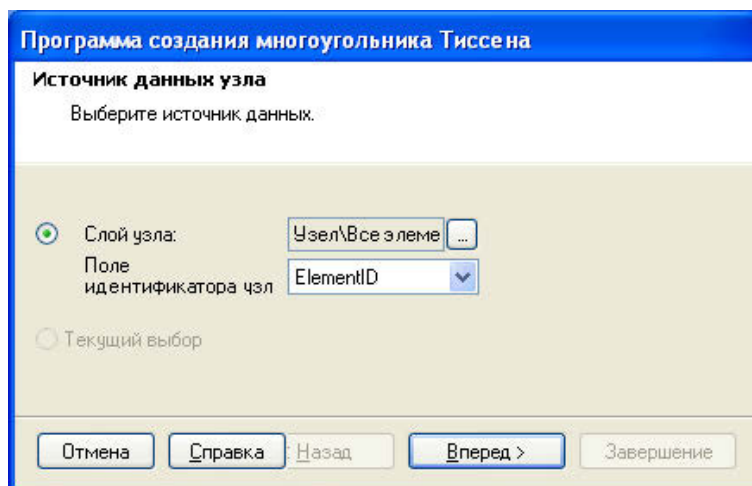
Рис. 6.30. Пропорциональное распределение нагрузки

---

Метод совокупного отбора предполагает, что каждому узлу назначена своя зона обслуживания. Отбор в узле определяется как сумма показаний счетчиков в соответствующей зоне.

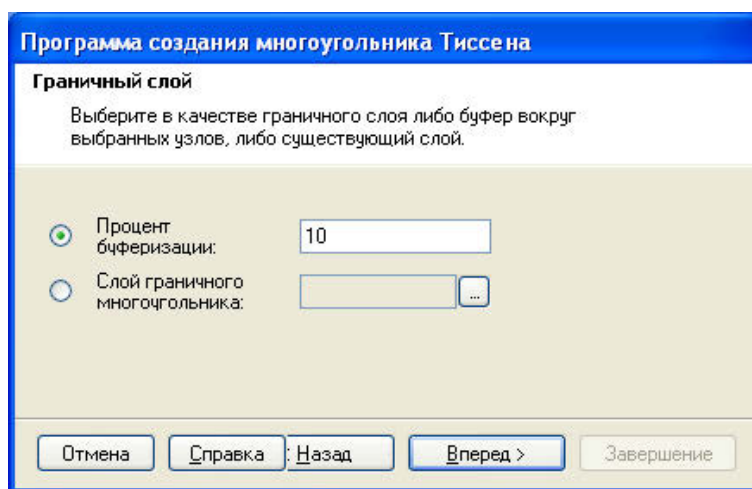
Сначала создадим зоны обслуживания узлов в виде многоугольников Тиссена. Для этого воспользуемся специальным инструментом WaterGEMS, который вызывается пунктом меню **Инструменты – Многоугольник Тиссена** или кнопкой .

На первом шаге построения многоугольников укажите слой узлов. В нашем случае это узлы самой сети (рис. 6.31).



*Рис. 6.31. Выбор слоя узлов*

На следующем шаге задается так называемый процент буферизации, т. е. процент увеличения площади района водоснабжения за пределами крайних узлов сети. Это позволяет задать внешнюю границу зоны обслуживания (рис. 6.32).



*Рис. 6.32. Указание процента буферизации*

Результат работы генератора многоугольников должен быть сохранен в виде шейп-файла (рис. 6.33).

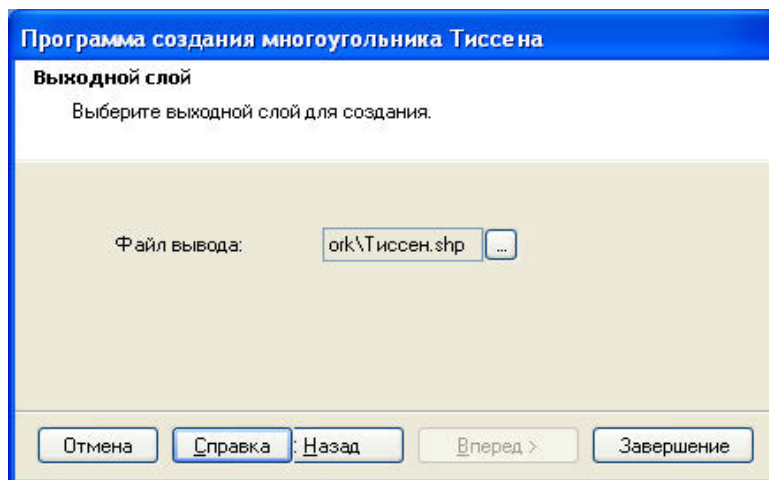


Рис. 6.33. Создание шейп-файла многоугольников

Для отображения многоугольников откройте созданный файл в качестве фона. Рекомендуем подобрать подходящий цвет линий и прозрачность многоугольников (рис. 6.34).

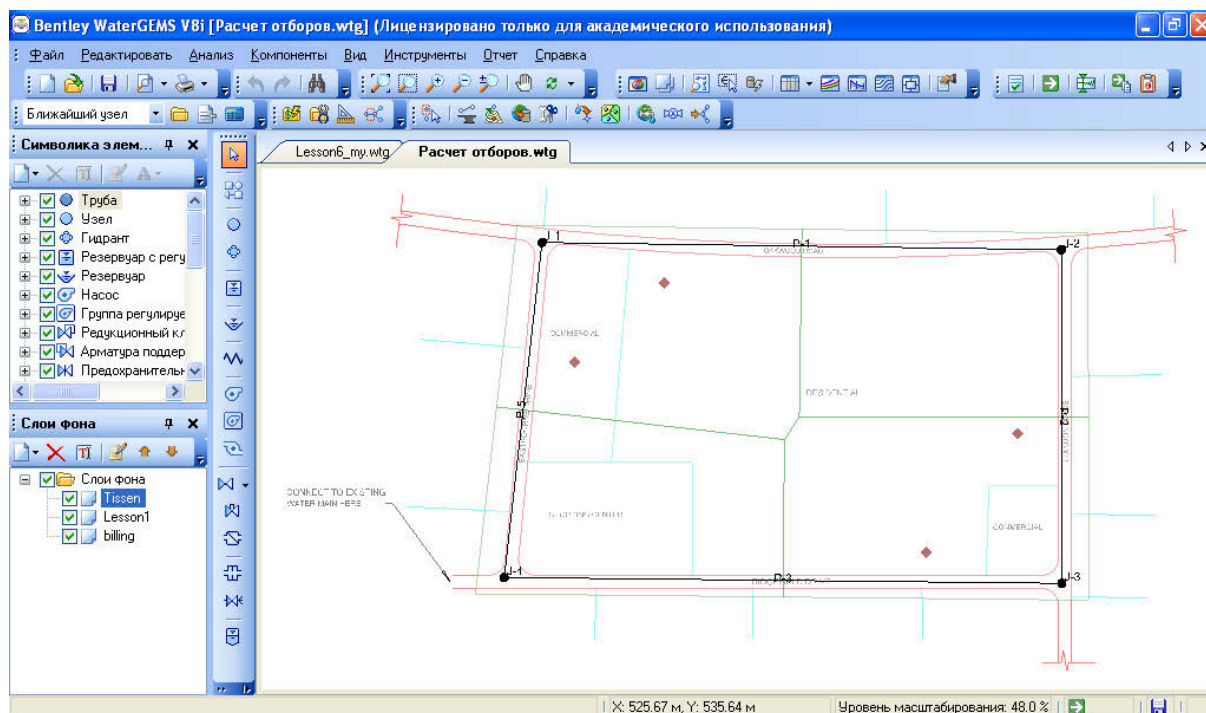


Рис. 6.34. Зоны обслуживания узлов на схеме сети

Снова запустите LoadBuilder. Метод совокупного отбора в ней называется *Объединение биллинговых счетчиков* (рис. 6.35).





Рис. 6.35. Метод совокупного отбора (объединение счетчиков)

Далее задайте параметры, показанные на нашем примере (рис. 6.36). Здесь слой зоны действия узлов – многоугольники Тиссена, сохраненные в виде шейп-файла на предыдущем этапе работы.

Рис. 6.36. Параметры объединения счетчиков

**Мастер LoadBuilder**

**Просмотр результатов**

Список расчетных нагрузок для каждого узла.

Идентификатор узла	Потребление (л/с)	Тип нагрузки	График
27: J-3	8	По умолчанию	Фиксированный
24: J-1	8	По умолчанию	Фиксированный

После завершения вычислений программа распределит все нагрузки между двумя узлами, поскольку лишь два многоугольника содержат водомерные счетчики (рис. 6.37).

Рис. 6.37. Результат распределения нагрузок

---

### 6.4.3. Сравнение методов расчета отборов

Предлагаем вам сравнить различные методы расчета узловых отборов с использованием заранее подготовленного проекта *Lbuilder.wtg* (проект предоставлен фирмой Bentley).

Откройте этот проект и сохраните его в своей рабочей папке. Тем или иным способом предлагаем убедиться, что узловые отборы еще не назначены. Эта сеть предназначена для водоснабжения небольшого городского микрорайона, учет водопотребления в котором осуществляется индивидуальными счетчиками. Координаты счетчиков и их показания представлены в виде шейп-файла *Meters.shp* (предоставлен фирмой Bentley). Откройте его в качестве фона (рис. 6.38).

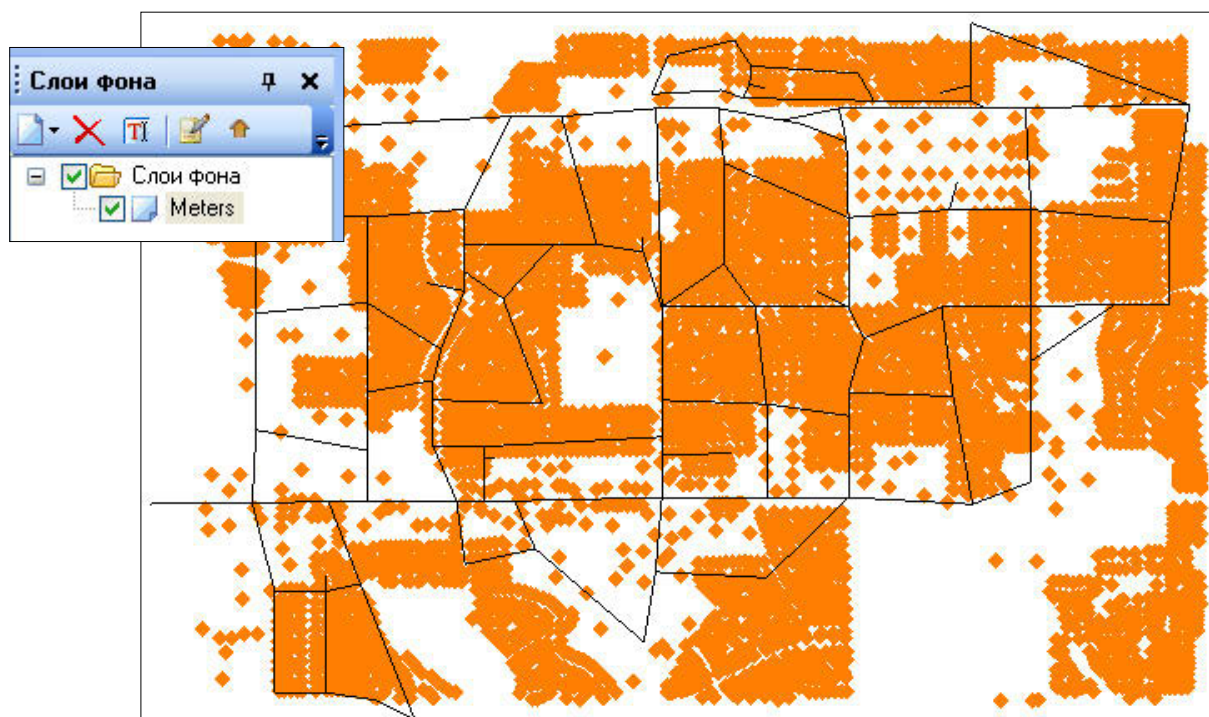


Рис. 6.38. Проект *Lbuilder.wtg*

Создайте многоугольники Тиссена. Полученный шейп-файл сохраните в своей папке и откройте в качестве второго фонового слоя (рис. 6.39).

Обратите внимание, что большое количество счетчиков находится за пределами построенных зон обслуживания, поскольку в расчетную схему включены не все трубопроводы и узлы.



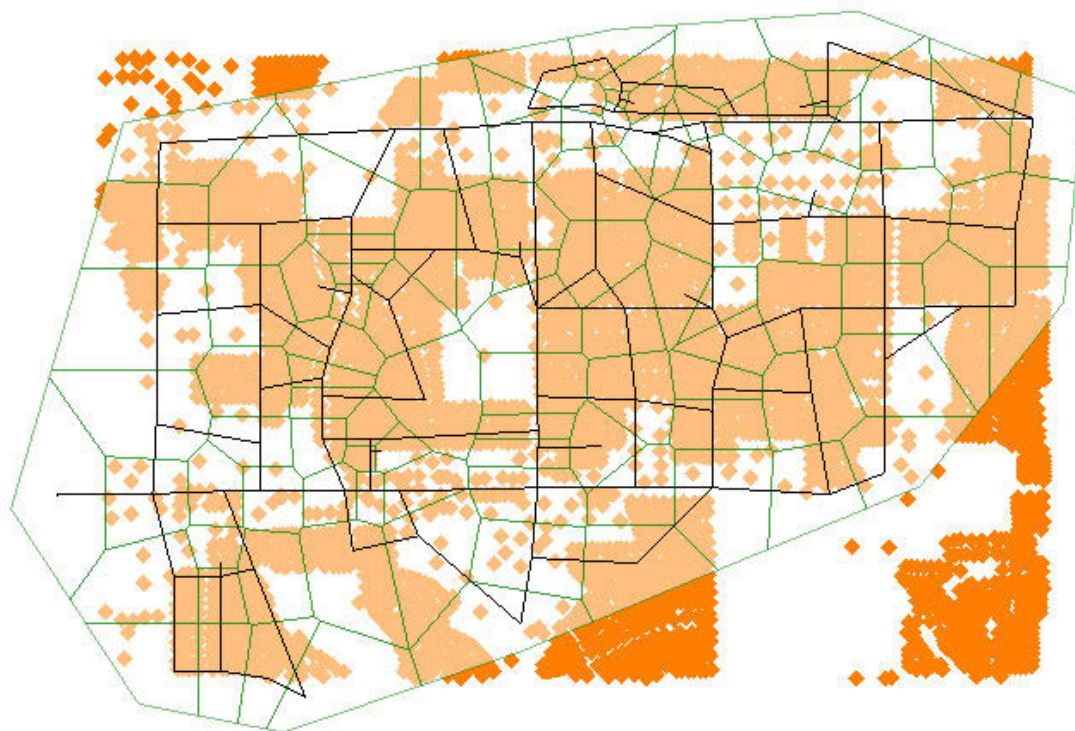


Рис. 6.39. Зоны обслуживания узлов проекта Lbuilder.wtg

Сначала предлагаем вам рассмотреть метод объединения биллинговых счетчиков. Задайте параметры, показанные на рис. 6.40.

**Мастер LoadBuilder**

**Объединение биллинговых счетчиков**

Введите данные для всех полей внизу и нажмите "Далее" для продолжения.

**Зона действия узла модели**

Слой зоны действия: son\_6\Lesson\_6\_my\Тиссен.shp ...

Поле идентификатора чзл: ELEMENTID

**Данные биллингового счетчика**

Слой биллингового счетчика: D:\Betley\Lesson\_6\Meters.shp ...

Поле типа нагрузки: <нет>

Поле использования: DEMAND галлон/мин

Рис. 6.40. Параметры расчета

Обратите внимание, что здесь и далее используются единицы измерения величин, принятые в США. Каждый потребитель в общем случае относится к той или иной группе, для которой может быть задан собственный график потребления. В данном примере мы этого учитывать не будем. Поэтому поле типа нагрузки имеет значение <нет>.

На следующем шаге программа рассчитает общее водопотребление сети (рис. 6.41).

Тип нагрузки	Потребление (галлон/мин)	Множитель	График
По умолчанию	952.80	1.000	Фиксированный

Глобальный множитель: 1.176  
Общая нагрузка: 952.80 галлон/мин

Рис. 6.41. Общее водопотребление сети

Обратите внимание на глобальный множитель. Как известно, количество воды, подаваемой в сеть, вследствие неизбежных утечек превышает учитываемое счетчиками. Предположим, что утечки составляют 15 % от объема подачи. Таким образом, вычисленный объем потребления необходимо увеличить на  $1,176 = 1 / (1 - 0,15)$ .

На следующем шаге программа рассчитает узловые отборы в соответствии с зонами их обслуживания (рис. 6.42).

Идентификатор узла	Потребление (галлон/мин)	Тип нагрузки	График
188: J-104	10.11	По умолчанию	Фиксированный
187: J-112	4.47	По умолчанию	Фиксированный
186: J-113	4.23	По умолчанию	Фиксированный
185: D1-115	22.34	По умолчанию	Фиксированный
184: D1-087	16.46	По умолчанию	Фиксированный
183: D1-126	16.23	По умолчанию	Фиксированный
182: D1-443	8.00	По умолчанию	Фиксированный
181: D 037	2.35	По умолчанию	Фиксированный

Рис. 6.42. Результаты расчета узловых отборов

На последнем шаге укажите на необходимость создания новой альтернативы, которая должна быть дочерней по отношению к имеющейся базовой альтернативе *Base-Average Dally* (рис. 6.43).

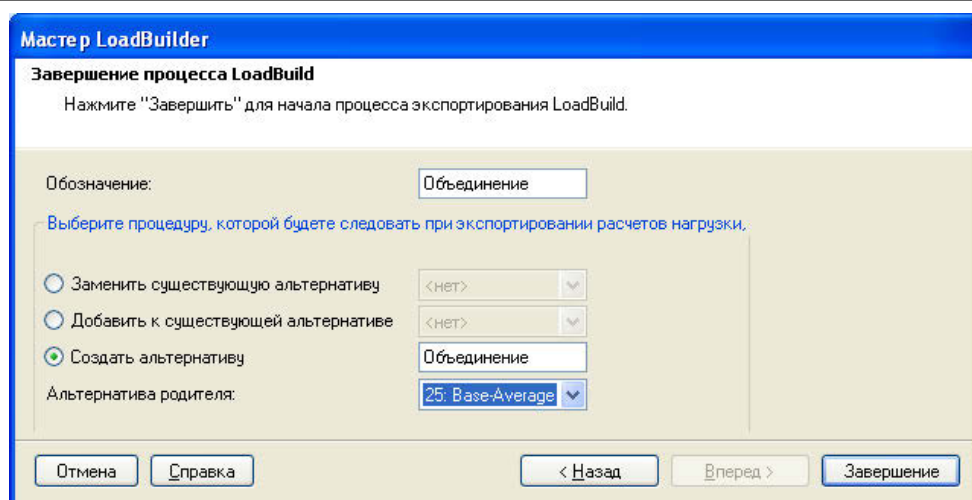


Рис. 6.43. Создание новой альтернативы потребления

После завершения работы LoadBuilder рекомендуем убедиться, что новая альтернатива создана. Самостоятельно создайте новый сценарий для выполнения расчетов на основе данной альтернативы (рис. 6.44).

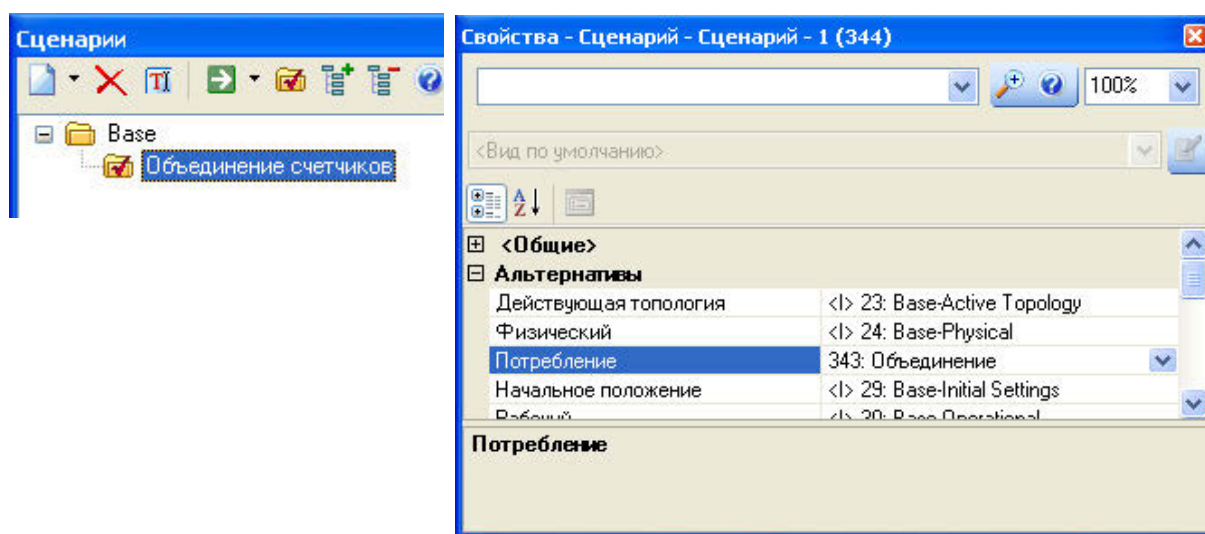


Рис. 6.44. Сценарий для расчета с альтернативой «Объединение»

После выполнения гидравлического расчета с целью последующего сравнения результатов по другим методикам зафиксируйте значения напоров в некоторых узлах, например: С\_028, D1-078 и D1-091 (64,9 м; 43,7 м; 66,4 м).

Предлагаем вам самостоятельно выполнить расчет узловых отборов методом ближайшего узла с тем же глобальным множителем (рис. 6.45).

Тип нагрузки	Потребление (галлон/мин)	Множитель	График
По умолчанию	1 088.60	1.000	Фиксированный

Глобальный множитель: 1.176

Общая нагрузка: 1 088.60 галлон/мин

Рис. 6.45. Общее водопотребление по методу ближайшего узла

Как и следовало ожидать, расчет дает более высокое водопотребление, т. к. теперь учитываются показания всех водометров.

После создания новой альтернативы завершите работу LoadBuilder. Создайте новый сценарий для выполнения расчетов на ее основе (рис. 6.46).

Рис. 6.46. Сценарий для расчета с альтернативой «Ближайший узел»

После выполнения гидравлического расчета зафиксируйте значения напоров в тех же узлах: C\_028, D1-078 и D1-091 (60,1 м; 38,8 м; 61,6 м).

Самостоятельно выполните гидравлический расчет при вычислении отборов методом ближайшей трубы (равномерное распределение без учета типа нагрузки) и зафиксируйте значения напоров



в узлах: C\_028, D1-078 и D1-091 (60,0 м; 38,9 м; 61,6 м). Они мало отличаются от результатов расчета по предыдущей методике.

Оценку водопотребления по плотности населения проиллюстрируем с использованием шейп-файла *PopulationCensus.shp* (предоставлен фирмой Bentley), содержащего необходимые сведения.

Этот файл создан средствами ГИС. Вся зона водоснабжения разделена на девять областей, рассчитаны их площади и введены величины плотности населения.

При желании вы можете открыть его в качестве еще одного фонового слоя (рис. 6.47).

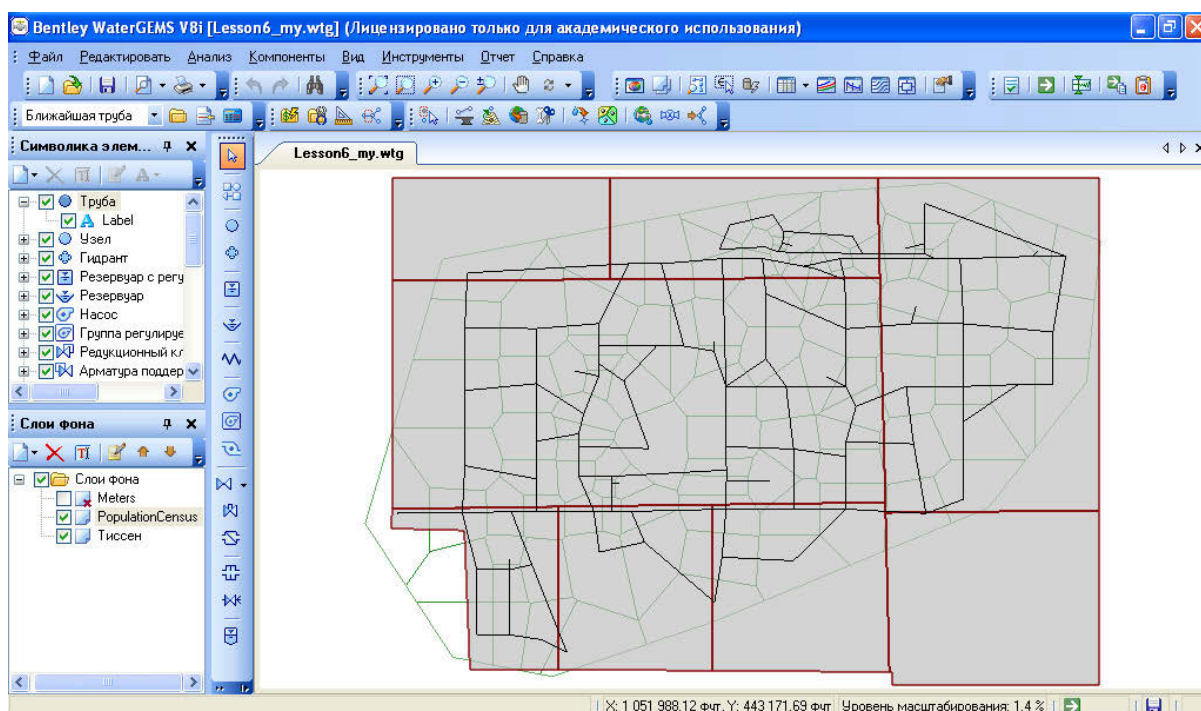


Рис. 6.47. Фоновый слой *PopulationCensus.shp*



Рис. 6.48. Выбор метода расчета

Снова воспользуйтесь инструментом *LoadBuilder*. На первом шаге работы Мастера укажите, что оценка водопотребления будет проводиться по плотности населения (рис. 6.48).

На следующем шаге в поле *Слой зоны действия*

укажите имя файла, содержащего многоугольники Тиссена (рис. 6.49).

**Мастер LoadBuilder**

**Оценка нагрузки по населению**  
Оценка нагрузки по населению

**Зона действия узла модели**

Слой зоны действия: D:\Betley\Lesson\_6\Work\Тиссе ...

Поле идентификатора узла: ELEMENTID

**Данные о населении**

Слой населения: D:\Betley\Lesson\_6\PopulationCe ...

Поле типа плотности населения: Type

Поле плотности населения: Density чел./акр

	Тип использования нагрузки	Плотность нагрузки (галл. в день/на человека)
1	R1	98,00
2	C	20,00
3	R2	82,00

Отмена Справка < Назад Вперед > Завершение

Рис. 6.49. Параметры расчета

В поле *Слой населения* укажите файл *PopulationCensus.shp*. Для правильного импорта данных нужно знать его структуру и размерность содержащихся в нем данных. Укажите в поле типа плотности населения значение *Type*, а размерность – чел/акр. В этом случае вы увидите, что все потребители разделены на три группы: C, R1 и R2. Они отличаются объемом водопотребления. Введите в поле *Плотность нагрузки* указанные значения.

На следующем шаге введите множитель, учитывающий утечки. Его можно задать отдельно для каждой группы потребителей. В нашем случае он одинаковый для всех групп – 1,176 (рис. 6.50).

Результаты расчета узловых отборов вы увидите после перехода к следующему шагу (рис. 6.51).

**Мастер LoadBuilder**

**Итоги расчета**  
Назначить график для каждого типа нагрузки.

	Тип нагрузки	Потребление (л/с)	Множитель	График
	R1	35,73	1,000	Фиксированный
	C	2,59	1,000	Фиксированный
	R2	2,35	1,000	Фиксированный

Глобальный множитель:

Общая нагрузка:  л/с

Рис. 6.50. Общее водопотребление

**Мастер LoadBuilder**

**Просмотр результатов**  
Список расчетных нагрузок для каждого узла.

	Идентификатор узла	Потребление (л/с)	Тип нагрузки	График
	162: D1-085	1,30	R1	Фиксированный
	161: D1-352	0,15	R1	Фиксированный
	160: D1-462	1,10	R1	Фиксированный
	159: D1-530	0,60	R1	Фиксированный
	159: D1-530	0,00	C	Фиксированный
	159: D1-530	0,36	R2	Фиксированный
	158: D1-520	0,91	R1	Фиксированный
	157: D1-427	0,35	R1	Фиксированный

Рис. 6.51. Результаты расчета узловых отборов

На завершающем шаге, как и ранее, введите наименование данного варианта расчета, например *Население*. Укажите, что на основе вычисленных отборов должна быть создана новая дочерняя альтернатива с тем же именем. Родительской для нее является альтернатива *Base-Average Daily* (рис. 6.52).



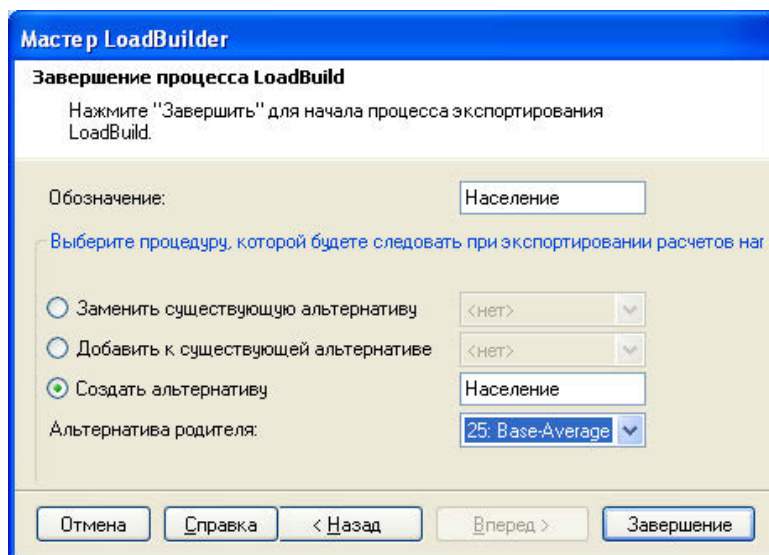


Рис. 6.52. Создание новой альтернативы

После создания новой альтернативы завершите работу LoadBuilder. Создайте новый сценарий для выполнения расчетов на основе альтернативы (рис. 6.53).

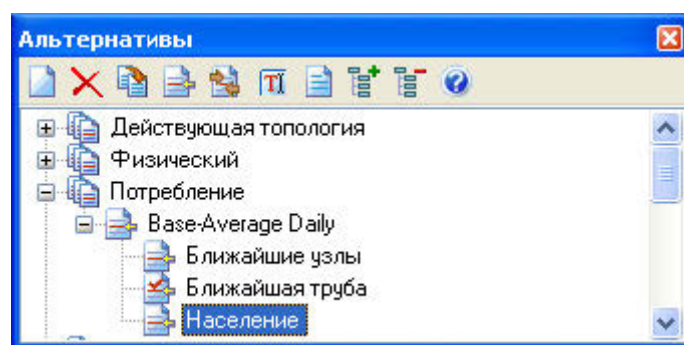


Рис. 6.53. Новая альтернатива потребления

Самостоятельно выполните гидравлический расчет и зафиксируйте значения напоров узлах: С\_028, D1-078 и D1-091 (74,4 м; 53,2 м; 75,8 м).

Обратите внимание, что напоры в узлах увеличились. Чем это можно объяснить? Попробуйте самостоятельно ответить на этот вопрос.

---

## 7. Гидравлическая калибровка модели

### 7.1. Виды калибровки

Математическая модель должна правильно отражать поведение реальной сети. Чаще всего результаты расчетов, проведенных на основе первоначально построенной модели, будут в той или иной степени отличаться от действительных значений параметров сети – узловых напоров и расходов воды в трубопроводах и т. д.

Процесс изменения параметров модели с целью достижения соответствия расчетных и фактических параметров сети называют калибровкой.

Каких-либо стандартов для определения степени адекватности модели не существует. Все зависит от вида решаемой задачи и требуемой точности расчетов. Наибольшая точность модели обычно требуется при детальном анализе работы сети, например, при оценке изменения качества воды, когда результаты моделирования используются при планировании развития сети и т. д.

Калибровка модели осуществляется на основе экспериментальных данных, получаемых при обследовании реальной сети.

В литературе рассматриваются несколько видов и способов калибровки:

- гидравлическая калибровка или калибровка для оценки изменения качества воды;
- статическая или динамическая (квазистатическая);
- ручная или автоматическая.

Гидравлическая калибровка – это подбор параметров модели, от которых зависят расходы воды в трубопроводах и напоры в узловых точках сети.

При проведении калибровки модели изменения качества воды дополнительно используются соответствующие экспериментальные данные, например концентрация хлора в тех или иных точках сети.

Статической называют калибровку, при которой используются экспериментальные данные, полученные в некоторый фиксированный момент времени, или осредненные за определенный период.

---

При динамической калибровке используют данные об изменении параметров сети во времени.

Ручную калибровку обычно выполняют с целью выявления влияния того или иного параметра на поведение сети. При этом пользователь сам последовательно изменяет его значение в заданных пределах.

Автоматическая калибровка выполняется с использованием математических методов поиска оптимальных решений. При этом исследуется влияние на поведение сети нескольких параметров модели одновременно.

Гидравлическая калибровка крайне важна для моделирования любых процессов. Кроме того, ее результаты используются при калибровке модели изменения качества воды.

Основными критериями соответствия модели реальной сети являются свободные напоры в узлах, поскольку их относительно просто измерить, не нарушая режим работы сети. К тому же именно их значения регламентируются СНиП.

Измерения свободных напоров должны проводиться одновременно в нескольких узловых точках сети, приблизительно равномерно распределенных по ее площади. Считается, что количество таких узлов должно определяться из расчета один узел на 4–5 км сети. В любом случае должны фиксироваться напоры на выходе из насосных станций, уровни воды в регулирующих резервуарах (водонапорных башнях), давления непосредственно на выходе из насосов (для определения их подачи).

В качестве критерия калибровки желательно использовать сведения о расходах воды в отдельных трубопроводах. Обычно таких экспериментальных данных мало. Чаще всего имеются сведения об объеме подачи воды в сеть. Эти расходы фиксируются стационарными расходомерами насосных станций. При отсутствии таких приборов подачу насосов можно оценить по их характеристикам.

Существуют приборы, позволяющие измерять расходы в отдельных трубопроводах сети (например, ультразвуковые). К сожалению, они весьма дороги и говорить об их массовом применении нельзя. К тому же на практике оказывается довольно трудно найти подходящий для измерений отрезок трубопровода, отвечающий требова-

---

ниям применения соответствующих приборов. Потому очень часто измерения проводят не там, где нужно, а там, где для этого имеются подходящие условия.

При выборе узлов и трубопроводов, где предполагается проводить измерения, следует убедиться, что они присутствуют на расчетной схеме сети, а не удалены в процессе ее упрощения.

В процессе калибровки параметры элементов сети подбираются такими, чтобы расчетные значения напоров и расходов были максимально близки к их измеренным значениям в соответствующих точках сети. Параметрами модели, которые подбираются в ходе калибровки, являются:

- шероховатость трубопроводов;
- коэффициенты местных гидравлических сопротивлений;
- состояние изолирующих задвижек (открыто или закрыто);
- характеристики насосов;
- параметры настройки регулирующих клапанов;
- узловые отборы.

## **7.2. Причины неадекватности модели сети**

Причинами неадекватности модели сети являются ошибки, допущенные при построении модели и при выполнении измерений параметров реальной сети:

- ошибки при вводе (импорте) схемы сети и ее параметров;
- отклонения фактических диаметров труб от принятых при расчете;
- неизвестные значения шероховатости поверхности труб;
- неизвестные величины узловых отборов, наличие несанкционированных отборов, сосредоточенных утечек;
- изменения параметров сети во времени;
- отклонения измеренных значений параметров сети от расчетных, обусловленные ее упрощением;
- отклонения реальных характеристик насосов от принятых при моделировании.

Рассмотрим некоторые из этих причин более подробно.

---

### 7.2.1. Ошибки ввода (импорта) схемы

Непреднамеренные ошибки штатных пользователей, операторов, системных администраторов и других лиц, обслуживающих информационные системы, являются наиболее распространенными причинами неадекватности модели. Пожары и наводнения не приносят столько бед, сколько безграмотность и небрежность в работе.

Очень часто ошибки возникают:

- из-за нежелания пользователей работать с информационной системой в связи с необходимостью освоения новых технологий;
- невозможности работать с системой в силу отсутствия соответствующей подготовки (недостаток общей компьютерной грамотности, неумение интерпретировать диагностические сообщения, неумение работать с документацией и т. п.);
- невозможности работать с системой в силу отсутствия технической поддержки (неполнота документации, недостаток справочной информации и т. п.).

Весьма опасны так называемые «обиженные» сотрудники – нынешние и бывшие. Они знакомы с порядками в организации и способны нанести немалый ущерб, например: испортить оборудование, целенаправленно ввести неверные данные или даже полностью их удалить.

Самый радикальный способ борьбы с ошибками ввода данных – максимальная автоматизация работы и строгий контроль.

Основными признаками наличия ошибок, допущенных при вводе схемы сети, являются:

- аномально высокие (низкие) значения свободных напоров в узлах или скоростей движения воды в трубопроводах;
- отличающиеся от ожидаемых направления движения воды в отдельных трубах.

Выявить ошибки первого рода достаточно легко, поскольку программы для моделирования сетей предусматривают возможность цветового кодирования параметров. Зная возможный диапазон изменения того или иного параметра (например, высотных отметок узлов, диаметров труб и т. п.), пользователь имеет возможность указать цвета, которыми будут отображаться на экране соответствующие элементы сети при тех или иных значениях параметров.

---

Конечно, можно обнаружить и ошибки второго типа, поскольку направления движения воды во всех трубопроводах указываются на расчетной схеме.

Наиболее типичными ошибками, допускаемыми при вводе (импорте) данных, являются:

- неверные размерности значений вводимых параметров;
- использование неверного разделителя целой и дробной части числа (точки или запятой);
- неправильное указание типа импортируемых значений (текстовые вместо числовых);
- ввод расстояния между узлами вместо фактической длины соединяющего их трубопровода;
- неправильное задание величины расстояния между узлами (допуска), при котором в процессе импорта схемы сети их следует считать одним узлом.

### *7.2.2. Отклонения фактических диаметров труб от принятых при расчете*

Диаметры трубопроводов – крайне важный геометрический параметр. К сожалению, их точные значения для большинства труб неизвестны. Строго говоря, точно можно установить лишь те значения диаметров, которые имели трубопроводы в момент их прокладки (хотя и в этом случае возможны ошибки из-за отклонений от проекта, не отраженных в документации).

Прежде всего, необходимо иметь в виду, что на схемах и в документах обычно указывают условные диаметры труб, которые отличаются от фактических.

Во-вторых, в течение многих лет эксплуатации диаметры могут изменяться. Металлические трубы, как известно, подвержены коррозии. В некоторых регионах качество воды, подаваемой в сеть, таково, что со временем происходит зарастание труб. На их поверхности происходит отложение нерастворимых химических соединений. При этом их проходное сечение существенно уменьшается (рис. 7.1).

Конечно, эти процессы по-разному проявляются в трубах из различных материалов. Коррозии и зарастанию наиболее подвержены стальные трубы, в меньшей степени – чугунные, а в пластмассовых

трубах эти процессы вообще не наблюдаются.

Влияние указанных факторов на адекватность модели во многом определяется скоростями движения воды в трубах. Оно тем более существенно, чем выше скорости, т. е. чем выше доля потерь напора, обусловленных трением. К сожалению, непосредственно определить внутренний диаметр того или иного действующего трубопровода практически невозможно. Об изменении проходных сечений можно судить либо по косвенным признакам (высокие потери напора), либо непосредственно при замене труб.



*Рис. 7.1. Отложения на поверхности трубы*

На практике скорости движения воды часто оказываются весьма низкими. В таких случаях некоторые отклонения значений диаметров практически не влияют на адекватность модели.

### *7.2.3. Ошибки значений узловых отборов*

В предыдущем разделе было показано, что методика определения узловых отборов оказывает очень существенное влияние на параметры модели, и особенно в тех случаях, когда водопотребление оценивается по нормативным показателям.

Количество воды, подающейся насосными станциями в любую сеть водоснабжения в течение того или иного периода (например, за месяц), превышает объем ее потребления, зафиксированный измерительными приборами. Разность этих объемов (неучтенное водопотребление) далее для краткости будем называть утечками. Утечки можно разделить на две группы: видимые (явные) и скрытые.

К видимым утечкам относят:

- крупные аварии трубопроводов;
- отбор воды из гидрантов на пожаротушение;
- отвод воды через гидранты с целью промывки трубопроводов и т. п.



---

Большинство таких утечек являются временными (например, они исчезают после ликвидации аварии, завершения промывки и т. д.). Существуют также и постоянные утечки, о существовании которых известно, но ликвидировать которые полностью невозможно, например, испарение воды с поверхности резервуаров.

К скрытым утечкам можно отнести:

- неплотности соединений элементов сети, прорывы трубопроводов без выхода воды на поверхность;
- неисправность или отсутствие измерительных приборов у потребителей;
- несанкционированные отборы;
- «утечки», обусловленные одновременностью снятия показаний измерительных приборов.

Скрытые утечки не имеют внешних проявлений. Об их наличии свидетельствует регулярное существенное превышение объемом подачи зарегистрированного объема потребления.

Мировая практика эксплуатации сетей свидетельствует, что при отлаженной системе контроля и учета подачи и потребления воды утечки не превышают 20 % объема подачи. Более высокие утечки являются поводом для обследования сети с целью обнаружения их причин и последующей ликвидации. Например, для обнаружения прорывов трубопроводов используют акустические методы. Утечки других типов можно обнаружить только путем анализа данных о фактических значениях напоров и расходов в различных частях сети с использованием специального программного обеспечения.

### **7.3. Принципы калибровки сети с использованием генетических алгоритмов**

Представим себе очень простой трубопровод, состоящий всего из пяти участков. Допустим, что, ориентируясь на известные величины напоров в узлах, необходимо подобрать значения коэффициентов шероховатости труб ( $C$ -фактор в формуле Хазена – Вильямса), при которых расчетные напоры будут наиболее близки к замеренным. Пусть для определенности значения этого коэффициента могут быть 70, 80, 90 и 100.

---

Достаточно очевидно, что общее количество всех возможных решений, из которых нужно будет выбрать наиболее соответствующее экспериментальным данным, равняется  $5^4 = 625$ . Если сеть состоит из десяти труб, то количество возможных решений увеличивается до  $10^4 = 10000$ . Естественно, что в реальных сетях, включающих сотни труб, количество возможных решений, которые должны быть проанализированы, огромно.

Для решения подобных задач наиболее подходят генетические алгоритмы. Генетические алгоритмы (ГА) – это стохастические, эвристические оптимизационные методы, впервые предложенные Холландом (1975). Они основываются на идее эволюции с помощью естественного отбора, выдвинутой Дарвином (1857).

ГА работают с совокупностью «особей» – популяцией, каждая из которых представляет собой возможное решение рассматриваемой проблемы. Применительно к нашему примеру каждая особь – это четыре конкретных значения коэффициента  $C$ , объединенных в так называемую хромосому.

Каждая особь оценивается мерой ее «приспособленности» согласно тому, насколько «хорошо» соответствующее ей решение задачи. В природе это эквивалентно оценке того, насколько эффективен организм при конкуренции за ресурсы.

При технических расчетах приспособленность каждой особи характеризуется значением так называемой фитнес-функции.

При гидравлической калибровке обычно применяется одна из следующих функций (обычно по выбору пользователя):

– сумма квадратов разностей

$$F = w_H \sum_{i=1}^{NH} (H_{m,i} - H_{o,i})^2 + w_Q \sum_{j=1}^{NQ} (Q_{m,j} - Q_{o,j})^2 ,$$

– сумма абсолютных разностей

$$F = w_H \sum_{i=1}^{NH} |H_{m,i} - H_{o,i}| + w_Q \sum_{j=1}^{NQ} |Q_{m,j} - Q_{o,j}| ,$$

---

– сумма максимальных отклонений

$$F = w_H \max |H_{m,i} - H_{o,i}| + w_Q \max |Q_{m,j} - Q_{o,j}|.$$

В этих выражениях:

$H_{m,i}$ ,  $Q_{m,j}$  – рассчитанные значения гидростатических напоров в узлах и расходы в трубопроводах соответственно;

$H_{o,i}$ ,  $Q_{o,j}$  – измеренные напоры и расходы в тех же узлах и трубах;

$NH$ ,  $NQ$  – количество измеренных напоров и расходов соответственно;

$w_H$ ,  $w_Q$  – весовые коэффициенты, учитывающие вклад в фитнес-функцию соответствующих разностей (очень часто их считают равными единице).

Задача состоит в том, чтобы отыскать особь с минимальным значением выбранной фитнес-функции. Не вдаваясь в детали реализации генетического алгоритма (ГА), которые описываются в специальной литературе, приведем лишь его основные идеи.

Наиболее приспособленные особи получают возможность «воспроизводить» потомство путем «скрещивания» с другими особями популяции. Это приводит к появлению новых особей, которые сочетают в себе некоторые характеристики, наследуемые ими от родителей. Наименее приспособленные особи с меньшей вероятностью смогут воспроизвести потомков, так что те свойства, которыми они обладали, будут постепенно исчезать из популяции в процессе эволюции. Иногда происходят мутации, т. е. случайные изменения в генах. Некоторые из них полезны, другие – вредны. Однако только мутации приводят к качественным изменениям популяции.

Как и при естественной эволюции, одна смена поколений не приводит к заметному прогрессу вида. Поэтому генетический алгоритм создает следующее поколение, последовательно применяя «выживание сильнейшего», скрещивание и мутацию. Затем таким же образом обрабатывается это новое поколение и так далее. Процесс повторяется тысячи или даже миллионы раз.

Критерием окончания расчетов является ситуация, когда в результате скрещивания уже не наблюдается улучшение решения. Иногда количество воспроизводства новых поколений хромосом

---

просто ограничивают некоторым числом. Упрощенная блок-схема ГА показана на рис. 7.2.

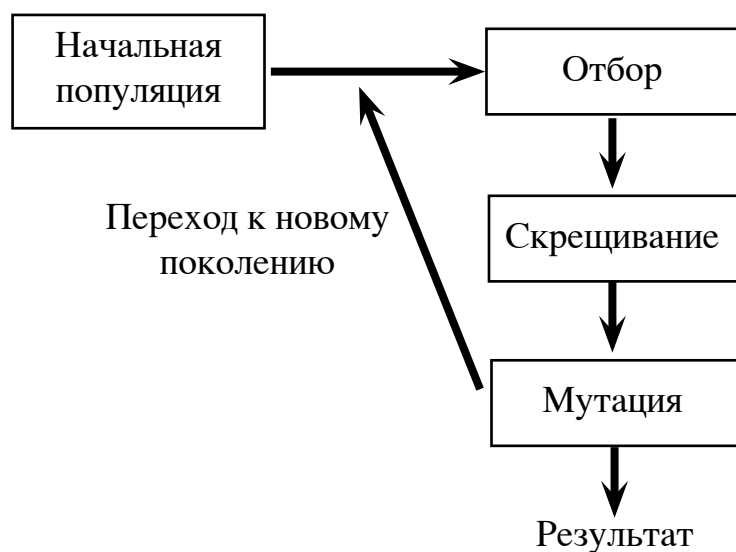


Рис. 7.2. Упрощенная блок-схема ГА

Замечательная черта генетических алгоритмов состоит в том, что они выполняют множество изолированных манипуляций с решениями задачи без малейшего представления о том, что же при этом происходит.

В программе WaterGEMS генетический алгоритм реализован в виде инструмента Darwin Calibrator.

## 7.4. Калибровка сети в среде WaterGEMS

### 7.4.1. Постановка задачи

В нашем распоряжении имеется заранее подготовленный проект *Calibrator.wtg* (предоставлен фирмой Bentley). Используя результаты обследования сети (полевые измерения), необходимо подобрать параметры модели, наилучшим образом соответствующие этим данным.

Схема сети представлена на рис. 7.3. Вода подается в сеть насосным агрегатом, характеристика которого известна. В сети имеются два регулирующих резервуара (водонапорные башни), уровень воды в которых не превышает 50 м (высота измеряется от условной общей для всех точек сети плоскости сравнения). Высотные отметки узловых точек известны с точностью до 0,5 м.

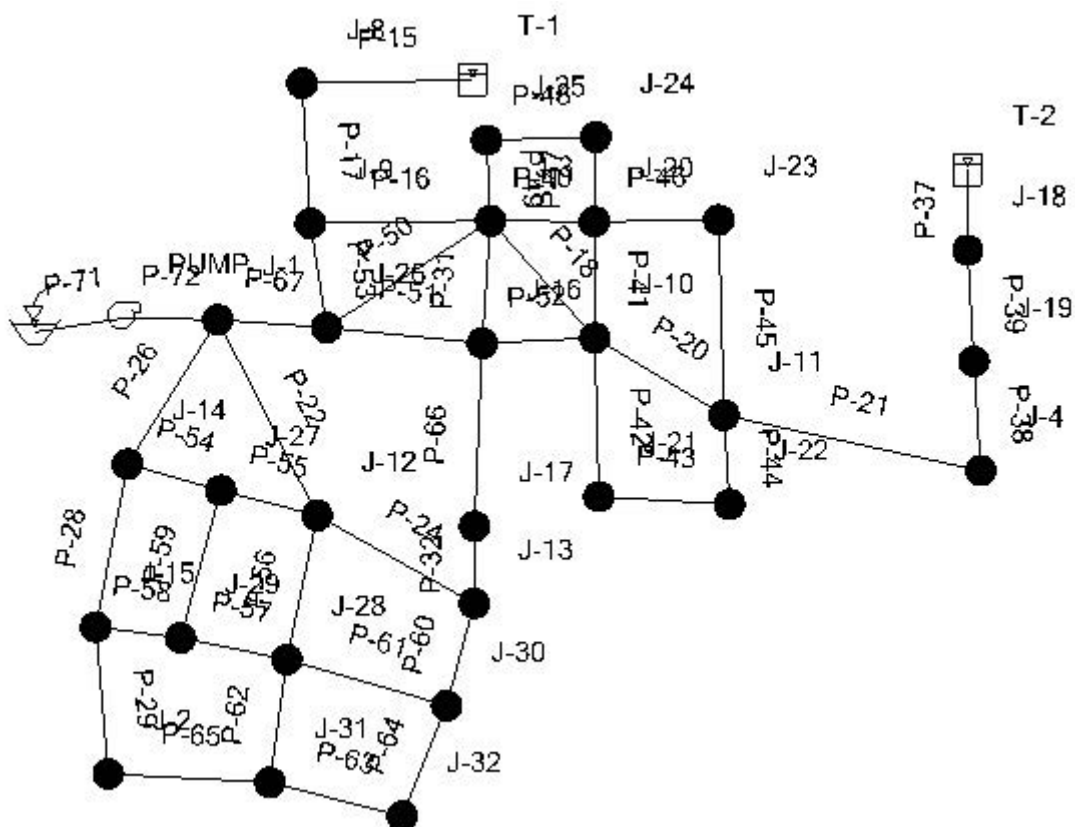


Рис. 7.3. Схема сети

Трубопроводы системы водоснабжения разделены на две группы:

- старые чугунные (cast iron), для которых коэффициент шероховатости  $C$  (коэффициент Хазена – Вильямса) первоначально принят равным 90;
- более новые чугунные (ductile iron), для которых коэффициент шероховатости  $C = 130$ .

Таблица 7.1

Серия измерений № 1

Узел	Гидростатический напор, м
J-1	50,6
J-2	47,9
J-4	48,8
J-8	48,8
J-12	49,4
J-13	49,1
J-23	48,8
J-32	48,8

Результаты обследования сети (полевые измерения) представлены в виде трех серий измерений.

1. Напоры в нескольких узловых точках сети при установившемся режиме работы, при подаче насоса  $Q = 42,8$  л/с (табл. 7.1).

2. Напоры в некоторых контрольных точках, полученные в ходе специальных исследований,

расходе воды через открытый гидрант J-10  $Q_{10} = 71,0$  л/с (табл. 7.2).

3. Напоры в некоторых контрольных точках, полученные в ходе специальных исследований, при подаче насоса  $Q = 49,8$  л/с и расходе воды через открытый гидрант J-31  $Q_{31} = 66,2$  л/с (табл. 7.3).

Таблица 7.2

Серия измерений № 2

Узел	Гидростатический напор, м
J-1	45,7
J-10	42,1
J-13	43,6


Таблица 7.3

Серия измерений № 3

Узел	Гидростатический напор, м
J-1	43,9
J-13	40,2
J-31	33,8

#### 7.4.2. Принципы использования *Darwin Calibrator*

Откройте проект *Calibrator.wtg* и сразу сохраните его в своей папке. Для удобства работы можете переименовать базовый сценарий. В нашем примере он называется *Среднее водопотребление*.

Для запуска *Darwin Calibrator* воспользуйтесь соответствующим пунктом главного меню **Анализ** или нажмите кнопку . После загрузки калибратора на экране появится окно начального диалога (рис. 7.4).

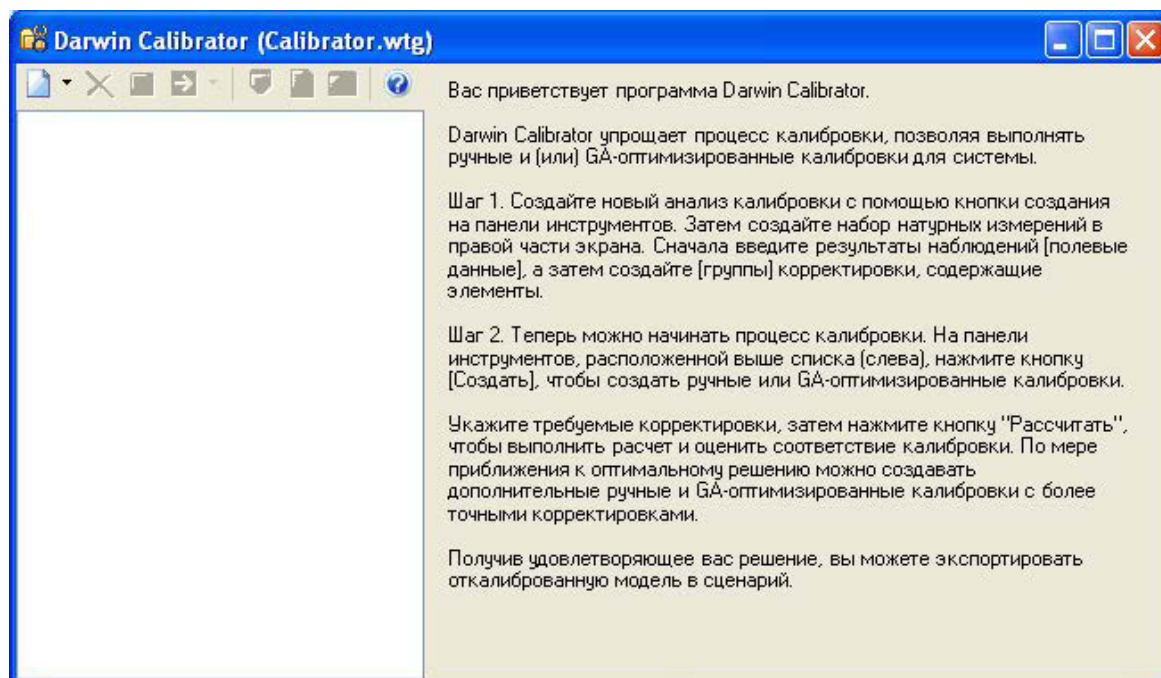



Рис. 7.4. Стартовое окно *Darwin Calibrator*

Нажмите кнопку  для создания нового анализа калибровки (рис. 7.5).

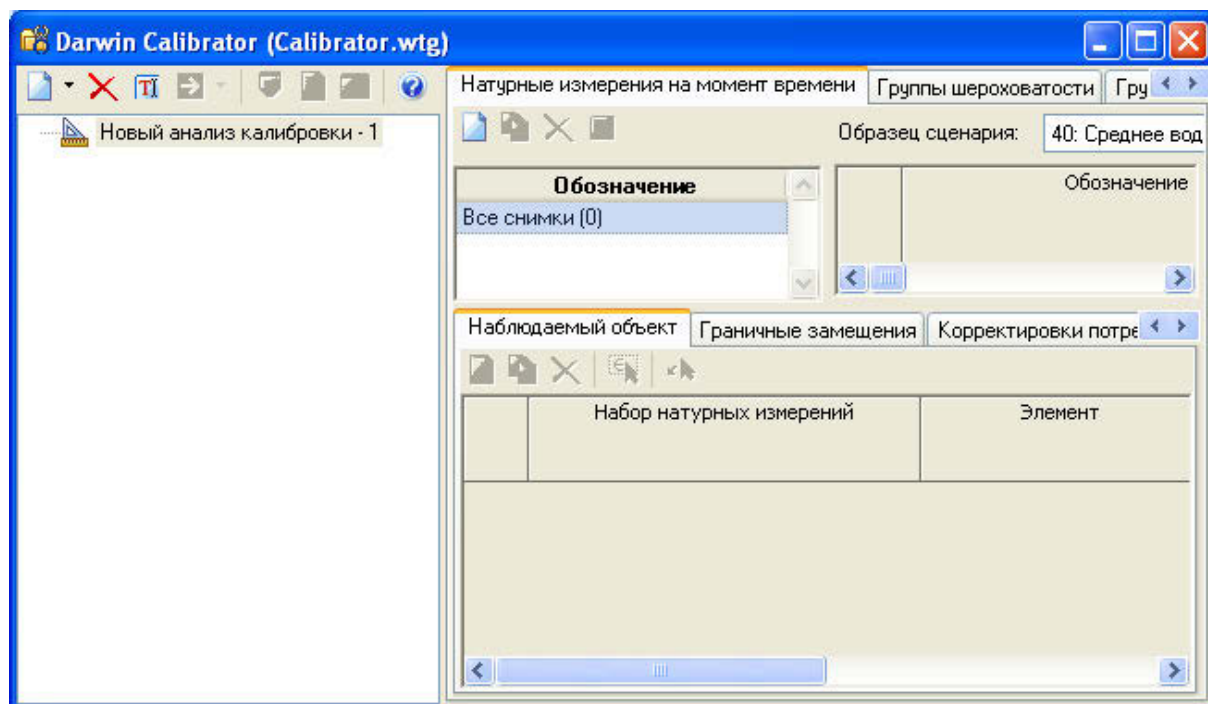



Рис. 7.5. Новый анализ

В нашем распоряжении имеются три набора экспериментальных данных. Их наименования следует указать в поле *Обозначение* на вкладке *Натурные измерения на момент времени*. С этой целью нажмите кнопку  – *Создать* на данной вкладке и сразу переименуйте набор данных (рис. 7.6).

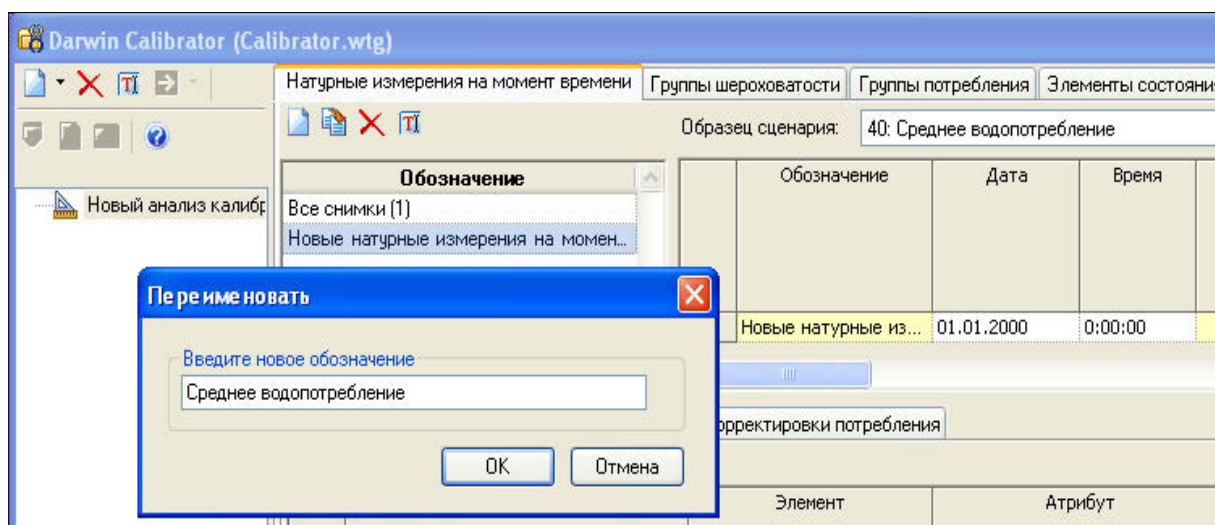


Рис. 7.6. Ввод наименования новой серии натурных измерений



При желании можно указать дату и время проведения данных измерений.

При расчетах мы не будем учитывать неравномерность водопотребления, поэтому *Множитель потребления* должен иметь значение 1 (рис. 7.7).

	Обозначение	Дата	Время	Время с начала (часов)	Заменить альтернативу сценария потребления?	Альтернативное потребление	Множитель потребления
1	Среднее во...	01.01.20...	0:00:00	0,000	<input type="checkbox"/>	25: Base-...	1,0

Рис. 7.7. Общие сведения о серии измерений

Следующий шаг – ввод экспериментальных данных из табл. 7.1. С этой целью нажмите кнопку – *Создать* на вкладке *Наблюдаемый объект*, а далее кнопку в графе *Элемент* (рис. 7.8).

	Набор натуральных измерений	Элемент	Атрибут	Значение
1	Среднее водопотребление	...	Пьезометрический напор (м)	0,0

Рис. 7.8. Ввод экспериментальных данных


Программа предложит вам указать объект на схеме сети. Первым объектом является узел J-1 (рис 7.9).

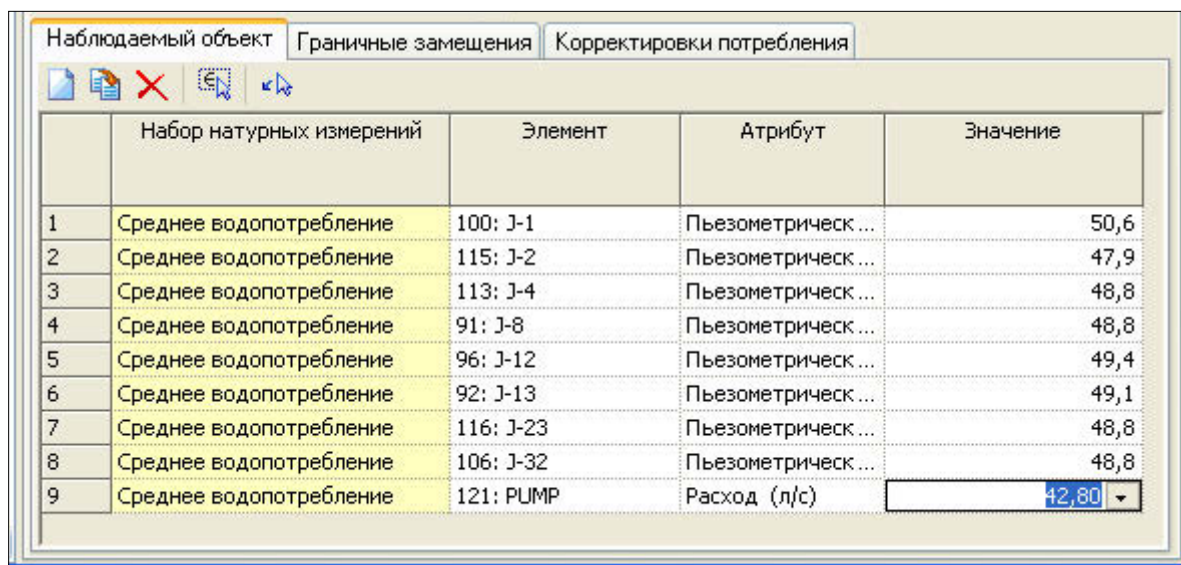
	Набор натуральных измерений	Элемент	Атрибут	Значение
1	Среднее водопотребление	100: J-1	Пьезометрический напор (м)	50,6

Рис. 7.9. Выбор объекта

После его выбора введите значение гидростатического напора. Обратите внимание: указывается именно гидростатический напор, т. е. сумма высотной отметки узла и свободного напора!


Аналогичным образом введите напоры в других узлах первого набора данных. Для ускорения ввода данных вы можете их копировать из прилагаемого файла *Исходные\_данные\_к\_работе\_7.doc*.

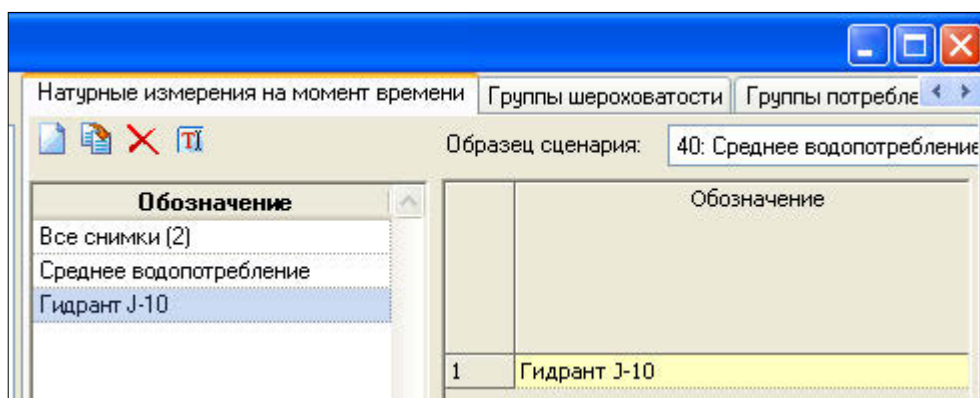
После ввода напоров еще раз нажмите кнопку  и введите подачу (расход) насоса, которая в первой серии измерений составляет  $Q = 42,8$  л/с (рис. 7.10).



	Набор натурных измерений	Элемент	Атрибут	Значение
1	Среднее водопотребление	100: J-1	Пьезометрическ ...	50,6
2	Среднее водопотребление	115: J-2	Пьезометрическ ...	47,9
3	Среднее водопотребление	113: J-4	Пьезометрическ ...	48,8
4	Среднее водопотребление	91: J-8	Пьезометрическ ...	48,8
5	Среднее водопотребление	96: J-12	Пьезометрическ ...	49,4
6	Среднее водопотребление	92: J-13	Пьезометрическ ...	49,1
7	Среднее водопотребление	116: J-23	Пьезометрическ ...	48,8
8	Среднее водопотребление	106: J-32	Пьезометрическ ...	48,8
9	Среднее водопотребление	121: PUMP	Расход (л/с)	42,80

Рис. 7.10. Ввод подачи насоса

Теперь введем данные для второй серии измерений из табл. 7.2. С этой целью нажмите кнопку  на вкладке *Натурные измерения на момент времени*. Далее эта серия данных называется *Гидрант J-10* (рис. 7.11).



Обозначение	
1	Гидрант J-10

Рис. 7.11. Создание новой серии данных

Введите данные из табл. 7.2 на вкладке *Наблюдаемый объект* (рис. 7.12).

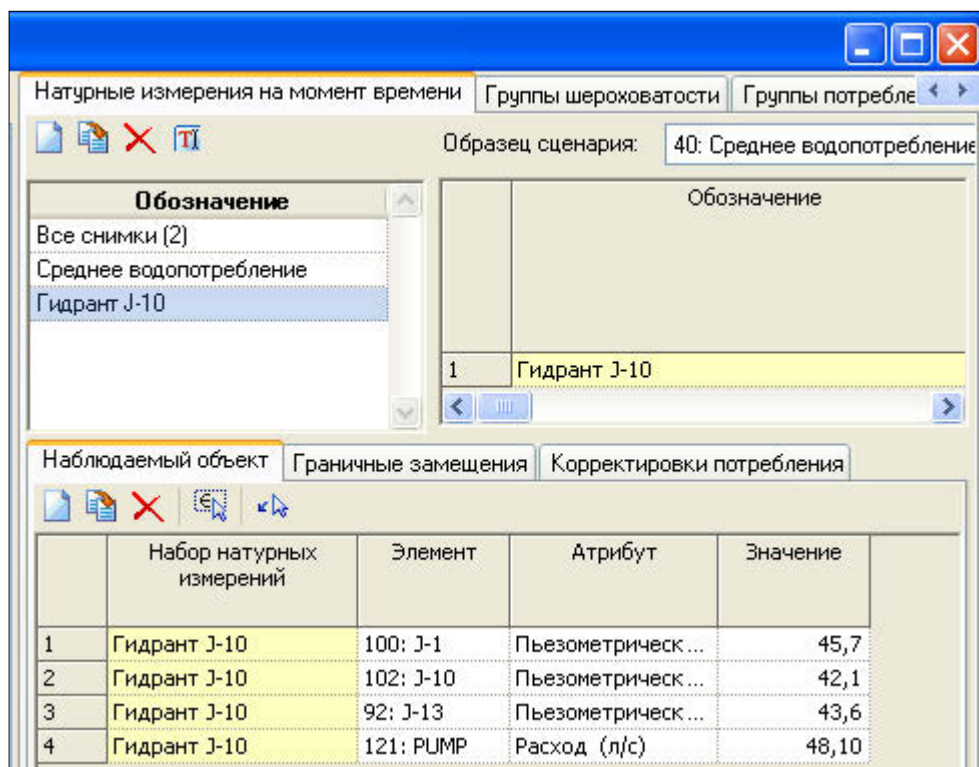


Рис. 7.12. Результаты 2-ой серии измерений

Как указано выше, вторая серия измерений проведена при открытом гидранте J-10 (рис. 7.13), т. е. при узловом отборе, отличном от представленного в исходном файле проекта для данного узла.


Для ввода измеренного расхода через гидрант перейдите на вкладку *Корректировки потребления* и нажмите кнопку , введите отбор 71,0 л/с (рис. 7.14).



Рис. 7.13. Измерение расхода через гидрант

Действуя в той же последовательности, введите данные третьей серии измерений *Гидрант J-31* (см. табл. 7.3) с учетом корректировки потребления для него 66,2 л/с.

Натурные измерения на момент времени    Группы шероховатости    Группы потребления

Образец сценария: 40: Среднее водопотребление

**Обозначение**

Все снимки (2)  
Среднее водопотребление  
Гидрант J-10

1 Гидрант J-10

Наблюдаемый объект    Граничные замещения    **Корректировки потребления**

	Набор натуральных измерений	Элемент	Дополнительное потребление (л/с)
1	Гидрант J-10	102: J-10	71,0

Рис. 7.14. Корректировка потребления (отбора) в узле J-10

Натурные измерения на момент времени    Группы шероховатости    Группы потребления

Образец сценария: 40: Среднее водопотребление

**Обозначение**

Все снимки (3)  
Среднее водопотребление  
Гидрант J-10  
Гидрант J-31

1 Гидрант J-31

Наблюдаемый объект    Граничные замещения    **Корректировки потребления**

	Набор натуральных измерений	Элемент	Атрибут	Значение
1	Гидрант J-31	100: J-1	Пьезометрическ...	43,9
2	Гидрант J-31	92: J-13	Пьезометрическ...	40,2
3	Гидрант J-31	103: J-31	Пьезометрическ...	33,8
4	Гидрант J-31	121: PUMP	Расход (л/с)	49,80

Наблюдаемый объект    Граничные замещения    **Корректировки потребления**

	Набор натуральных измерений	Элемент	Дополнительное потребление (л/с)
1	Гидрант J-31	103: J-31	66,20

Рис. 7.15. Результаты 3-й серии измерений




Следующий шаг работы – задание параметров калибровки. В нашем случае это сопротивление трубопроводов, точнее – коэффициент шероховатости  $C$ .

Поскольку сеть включает трубы двух типов (старых и новых чугунных), можно создать две группы шероховатостей. Трубы, включенные в каждую группу, будут иметь одинаковое значение коэффициента  $C$ .

Можно, конечно, создать и большее количество групп (минимальное количество элементов в группе – один), но чем больше групп, тем больше объем вычислений и требуемое для них время.

Поскольку используется заранее подготовленный проект, нужно принимать во внимание используемые в нем наименования материалов:

- трубопроводы первой группы – Castom Iron;
- трубопроводы второй группы – Ductile Iron.

Итак, нажмите кнопку  на вкладке *Группы шероховатости* и введите наименование группы *Castom Iron* (рис. 7.16). Далее нажмите кнопку  в графе *Идентификаторы элементов*.

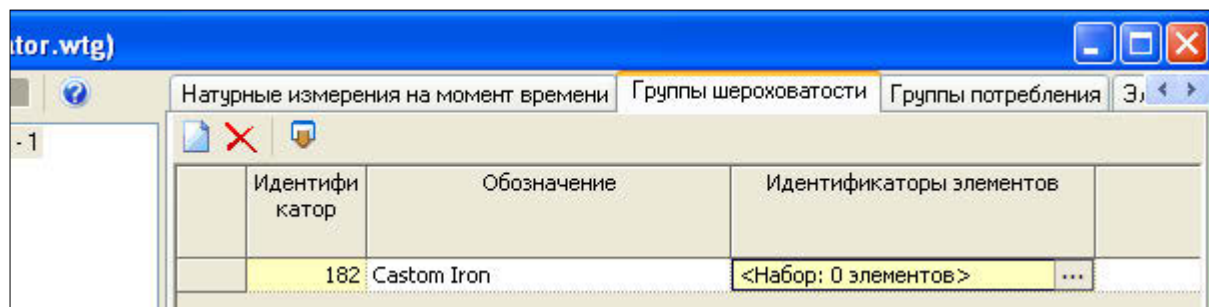



Рис. 7.16. Создание группы шероховатости

Вы увидите окно *Выбранный набор*, в которое необходимо ввести обозначения труб, включаемых в данную группу (рис. 7.17). В нашем случае их удобнее всего выбрать из схемы сети, для чего нажмите кнопку .

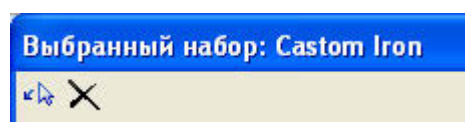



Рис. 7.17. Заголовок окна выбора элементов

Для автоматического определения требуемого набора труб воспользуемся фильтром – *Настраиваемым запросом* (рис. 7.18).



В правой части окна нажмите кнопку  – *Уникальные значения*. Конструктор проанализирует проект и выведет перечень всех найденных материалов труб (рис.7.20). Двойным щелчком по записи *Cast iron* введите его в запрос:

Physical\_PipeMaterial ='Cast iron'.

Завершите работу *Конструктора* кнопкой ОК. Отвечающие запросу трубопроводы будут выделены цветом на схеме сети (рис. 7.21).

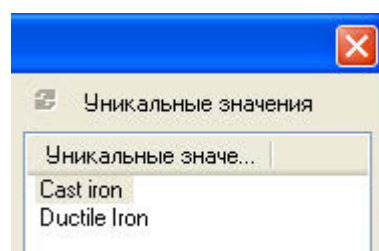


Рис. 7.20. Материалы труб из проекта

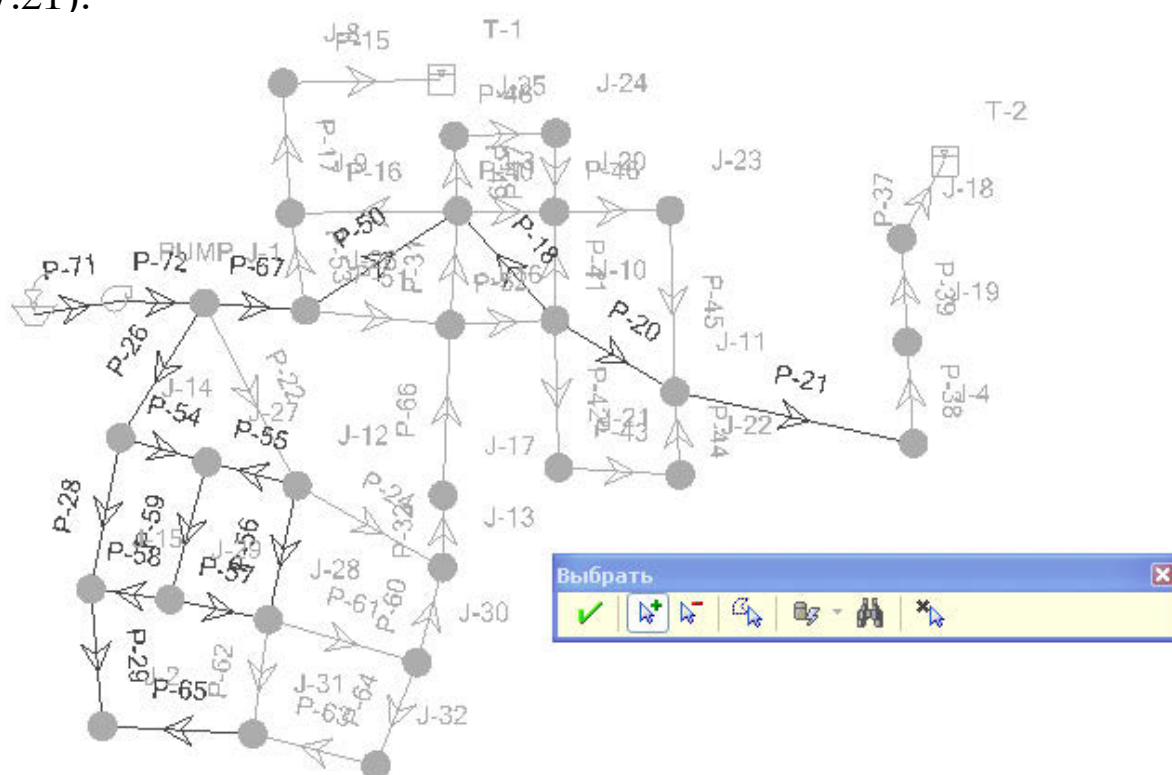



Рис. 7.21. Трубы, включенные в группу Cast iron

Завершите процедуру выбора кнопкой  на плавающей панели. Выделенные трубопроводы будут включены в выбранный набор (рис. 7.22).

Выбранный набор: Castom Iron

	Обозначение	Идентификатор элемента
122	P-67	122
124	P-20	124
125	P-56	125
126	P-65	126
127	P-57	127
129	P-21	129

Удалить все

Рис. 7.22. Выбранные трубы



Завершите работу со списком кнопкой *ОК*. В первую группу шероховатости должны быть включены 17 труб.

Действуя в той же последовательности, создайте группу шероховатости *Ductile Iron*. В нее должны быть включены 29 труб (рис. 7.23).

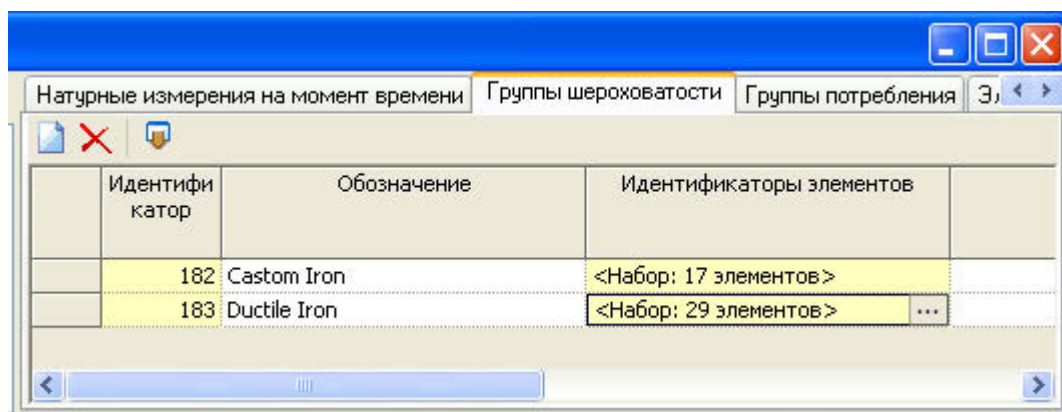


Рис. 7.23. Группы шероховатости

### 7.4.3. Ручная калибровка

Сначала предлагаем вам выполнить ручную калибровку. Создайте *Новый ручной запуск* (рис. 7.24).

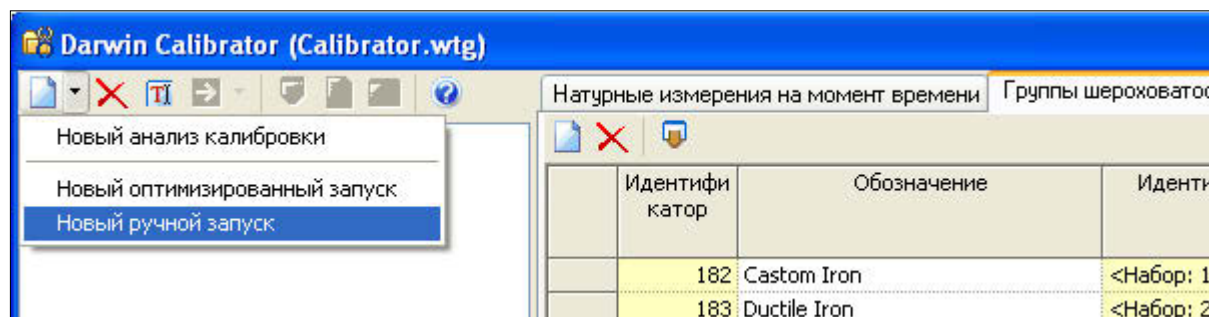


Рис. 7.24. Создание нового ручного запуска

Назовите его, например, *Базовый расчет*. На вкладке *Шероховатость* укажите *Значение* 1,0 для обеих групп. Иными словами, расчет будет выполнен с исходными значениями коэффициента *C* (рис. 7.25).

Нажмите кнопку  – *Рассчитать*.

После щелчка по пункту *Решения* вы увидите величину стандартного отклонения рассчитанных значений от экспериментальных (рис. 7.26).

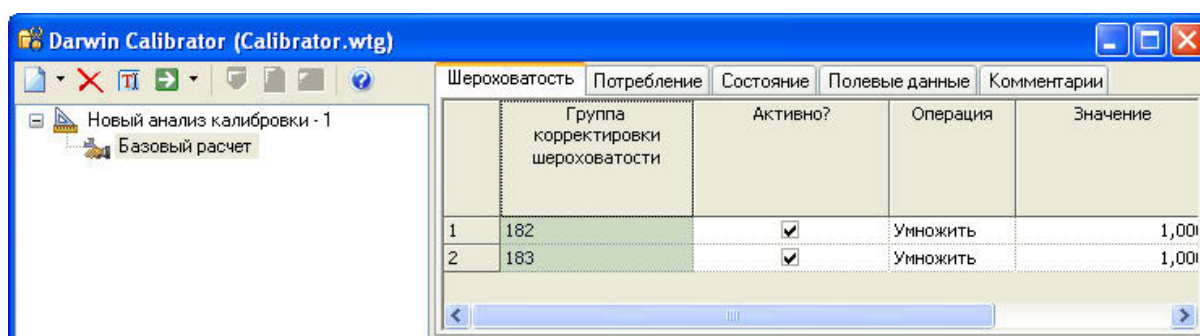


Рис. 7.25. Параметры базового расчета

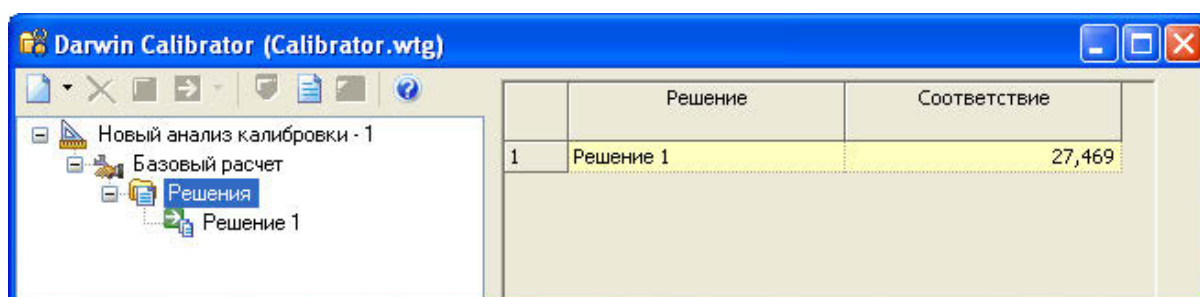


Рис. 7.26. Общие результаты расчета

Для подробного анализа результатов щелкните по пункту *Решение 1* и откройте вкладку *Simulated Results* (рис. 7.27).

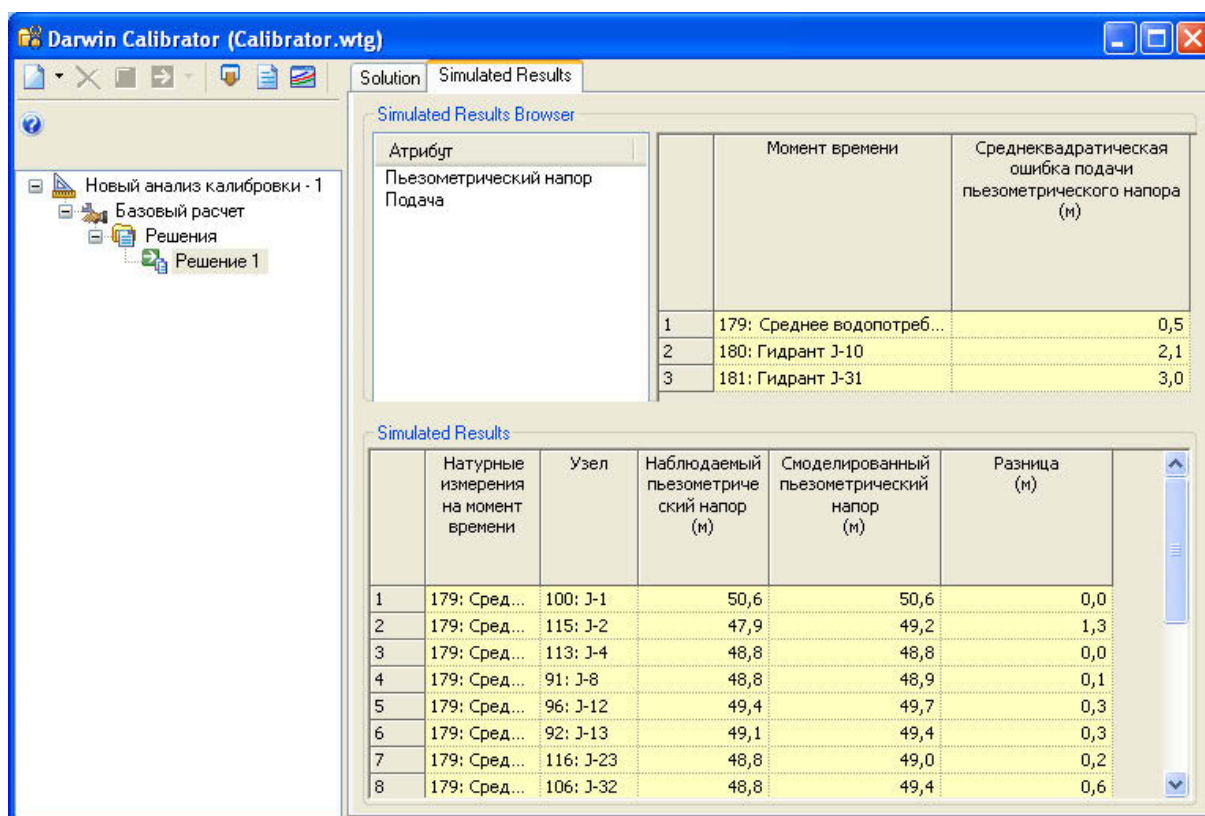


Рис. 7.27. Полные результаты расчета

Результаты этого расчета вы найдете также в колонке *Базовый расчет* сводной таблицы (п. 7.4.7).

В процессе ручной калибровки пользователь сам задает те или иные значения варьируемых параметров. В данном случае рассмотрим вариант расчета с уменьшенными в два раза значениями коэффициента *C*.

Установите курсор на пункт *Новый анализ калибровки - 1* в левой части окна *Darwin Calibrator* и создайте *Новый ручной запуск*. В правой части на вкладке *Шероховатость* введите *Значение* 0,5 для обеих групп (рис. 7.28).

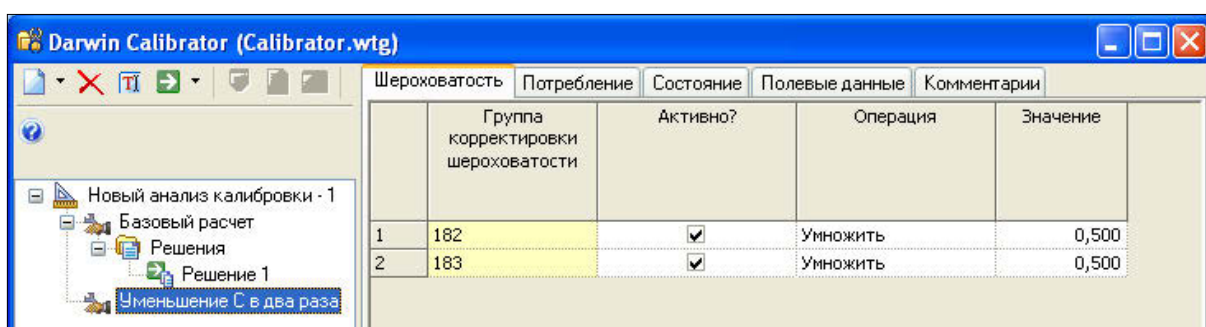


Рис. 7.28. Параметры запуска с уменьшенной шероховатостью

Выполните расчет. Обратите внимание на существенное увеличение стандартного отклонения по сравнению с базовым расчетом (рис. 7.29). Результаты этого расчета вы найдете также в колонке *Уменьшение C в два раза* сводной таблицы (п. 7.4.7).

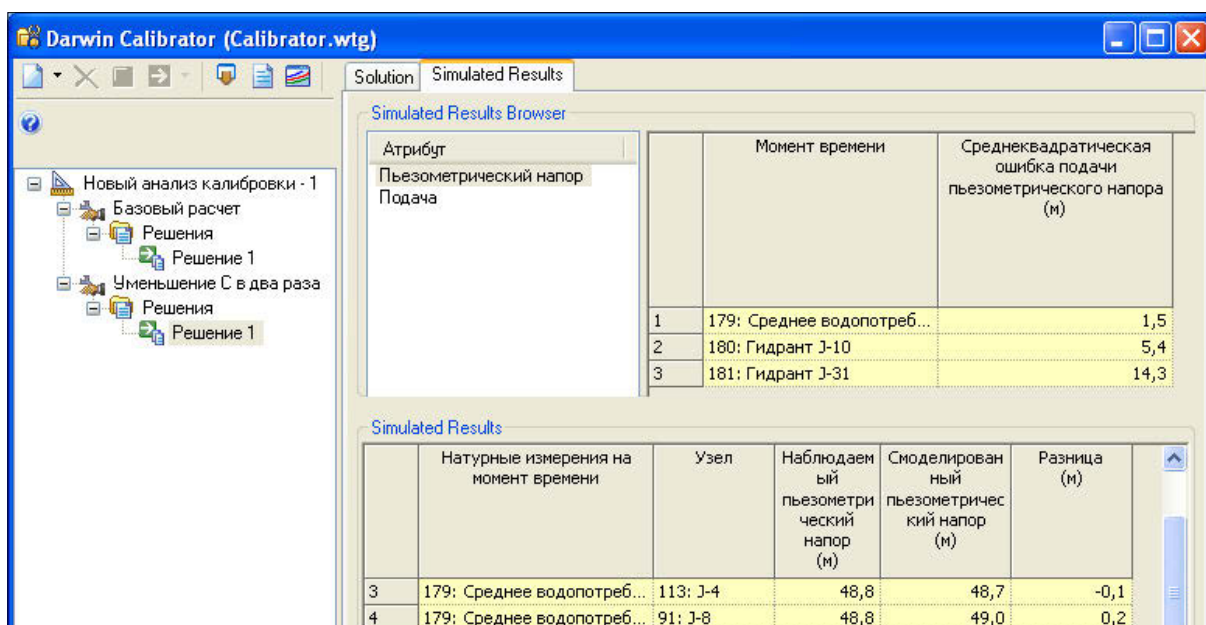



Рис. 7.29. Результаты расчета с уменьшенной шероховатостью

Вы можете увидеть результаты расчетов в виде графика. Для его построения достаточно нажать кнопку  – *График* окна *Darwin Calibrator* (рис. 7.30).

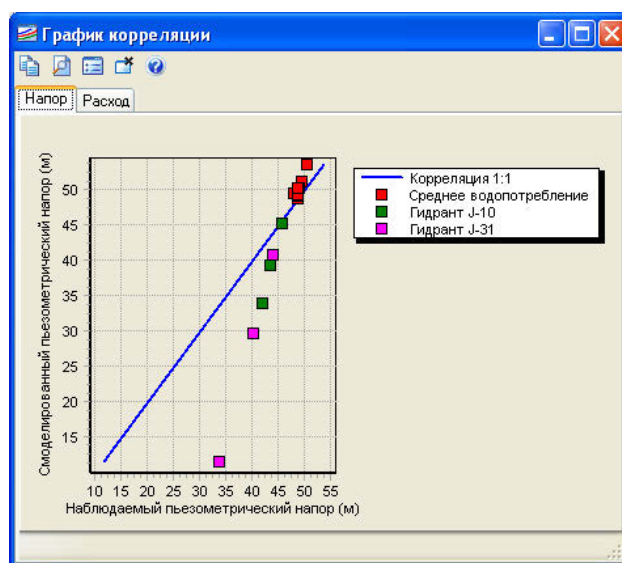


Рис. 7.30. Графическое представление результатов

#### 7.4.4. Автоматический подбор сопротивлений труб

Существенного увеличения качества калибровки и уменьшения времени расчетов позволяет достигнуть автоматическая калибровка.

Установите курсор на пункт *Новый анализ калибровки -1* в левой части окна *Darwin Calibrator* и задайте *Критерии калибровки* на соответствующей вкладке справа (рис. 7.31).

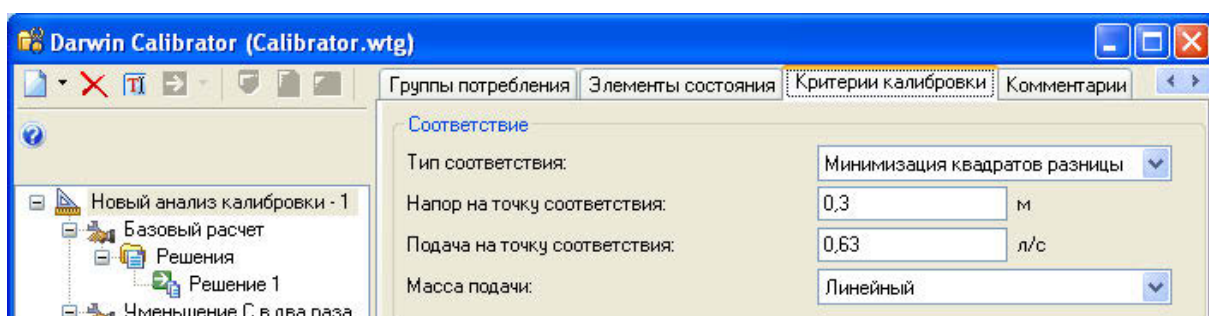


Рис. 7.31. Критерии автоматической калибровки

Создайте *Новый оптимизированный запуск*. Калибровка будет осуществляться только за счет изменения коэффициента  $C$  в диапазоне от  $0,5C$  до  $1,5C$  с шагом изменения  $0,1C$ . Именно эти значения должны быть установлены на вкладке *Шероховатость* (рис. 7.32).



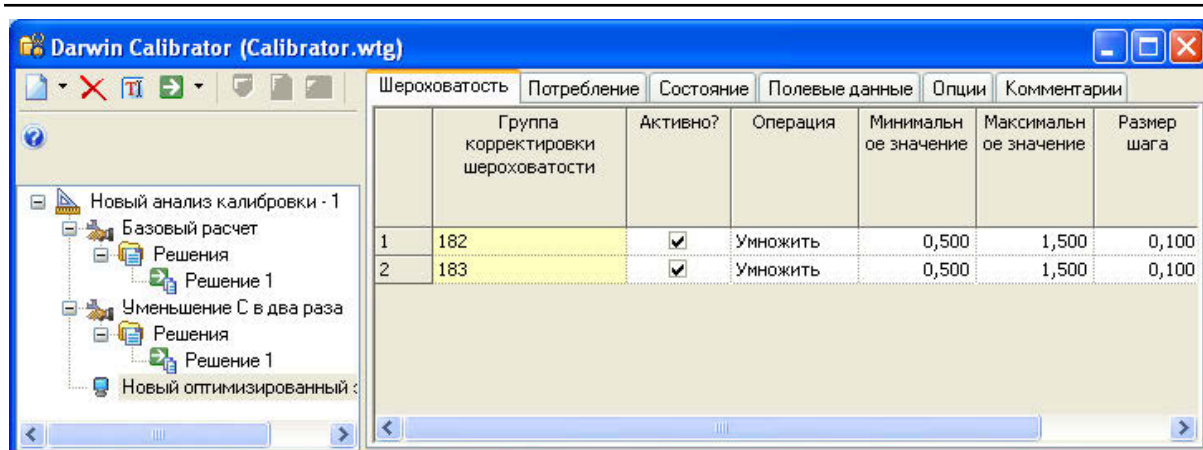


Рис. 7.32. Параметры запуска

На вкладке *Опции* укажите параметры генетического алгоритма, показанные на рис. 7.33.

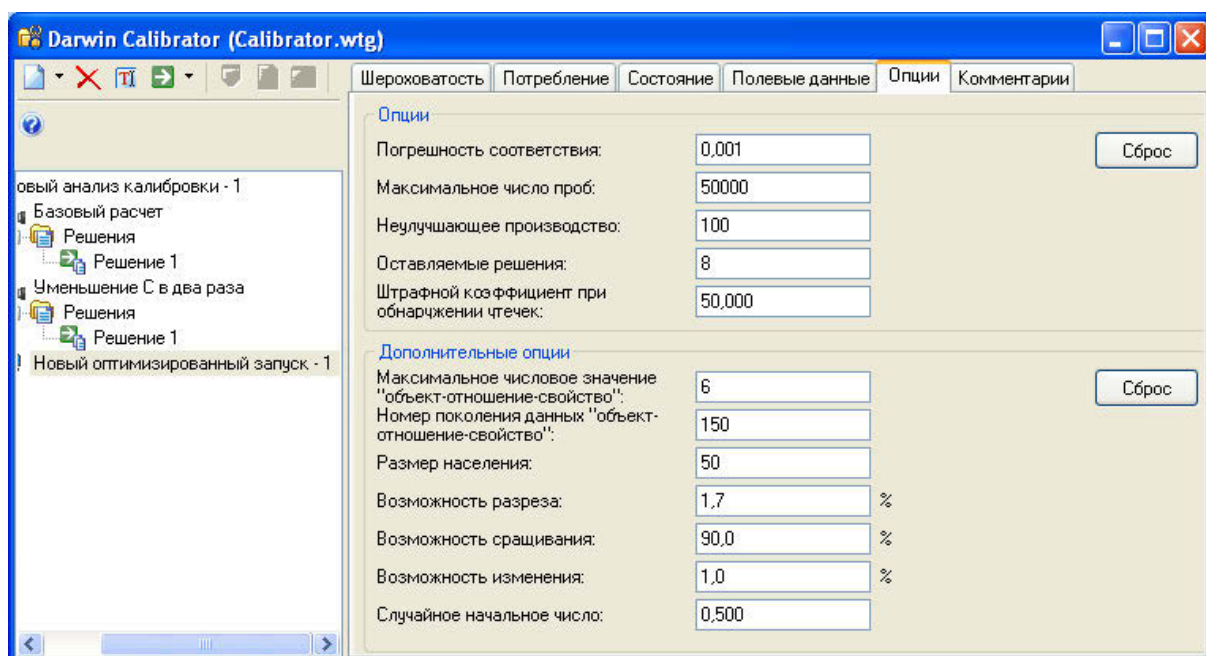


Рис. 7.33. Параметры генетического алгоритма

Запустите расчет. Через некоторое время вы увидите сообщение программы о завершении расчетов. В соответствии с ранее заданными опциями программа сохранила 8 наилучших решений. Убедитесь, что наименьшее значение стандартного отклонения достигнуто при *Решении 1* (рис. 7.34).

Результаты этого расчета вы найдете также в колонке *Оптимизация 1* сводной таблицы (п. 7.4.7).

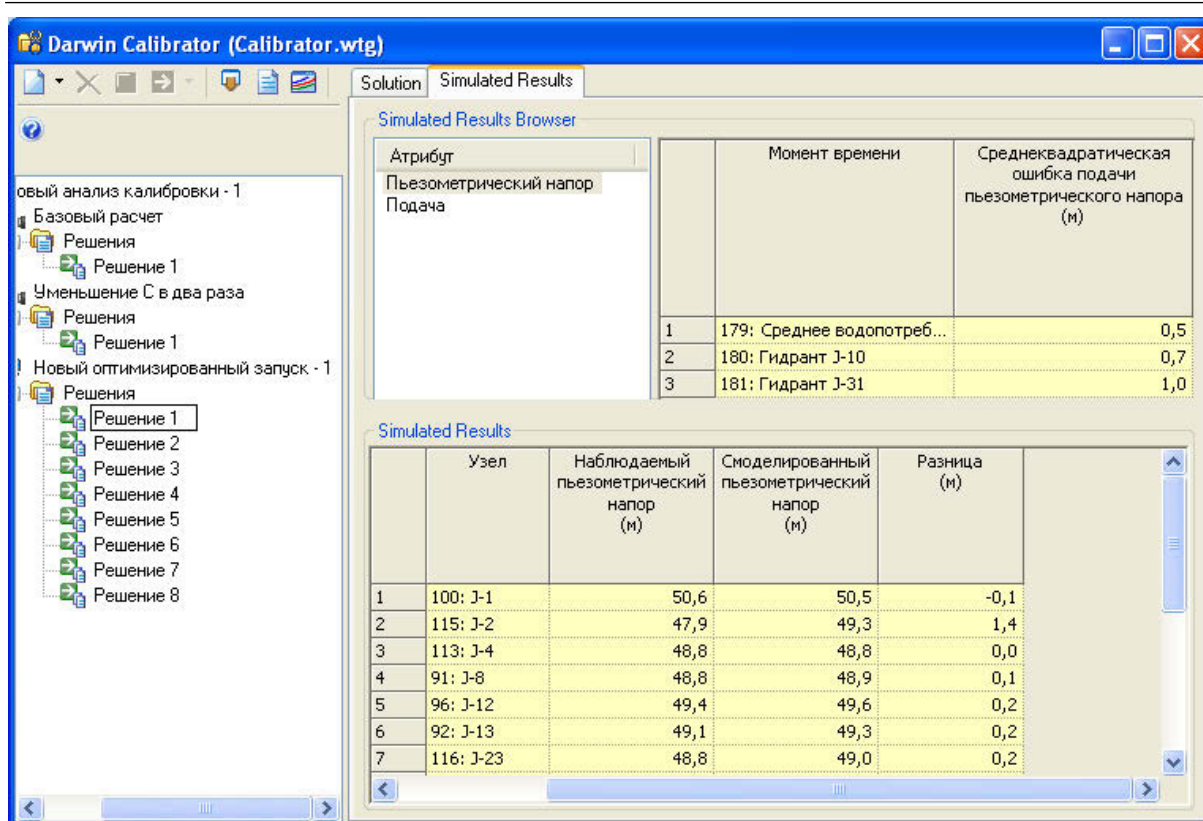


Рис. 7.34. Результаты оптимизации

Обратите внимание, что коэффициент  $C$  для труб группы *Castom Iron* увеличен в 1,5 раза. В то же время для труб группы *Ductile Iron* он уменьшился до 91.

Напомним, что увеличение коэффициента Хазена – Вильямса  $C$  свидетельствует об уменьшении шероховатости! Такой вывод должен вас насторожить. Вполне возможно, что причина несоответствия расчетных и экспериментальных данных обусловлена не только изменением сопротивления трубопроводов, но и неточными значениями узловых отборов.

#### 7.4.5. Автоматический подбор узловых отборов

Одной из вероятных причин несоответствия расчетных и опытных значений узловых напоров могут быть ошибки при определении отборов. Проверим обоснованность этого предположения для рассматриваемой сети.

Известно, что в данной сети имеются потребители двух типов: население и предприятия. При этом предприятия в основном сконцентрированы около узлов J-2, J-10, J-13, J-16, J-22, J-27, J-28 и J-30.

Таким образом, можно создать две группы потребления. Для этого установите курсор на *Новый анализ калибровки - 1* на левой панели калибратора и откройте вкладку *Группы потребления* слева. Создайте группу потребления *Предприятия* (рис. 7.35).

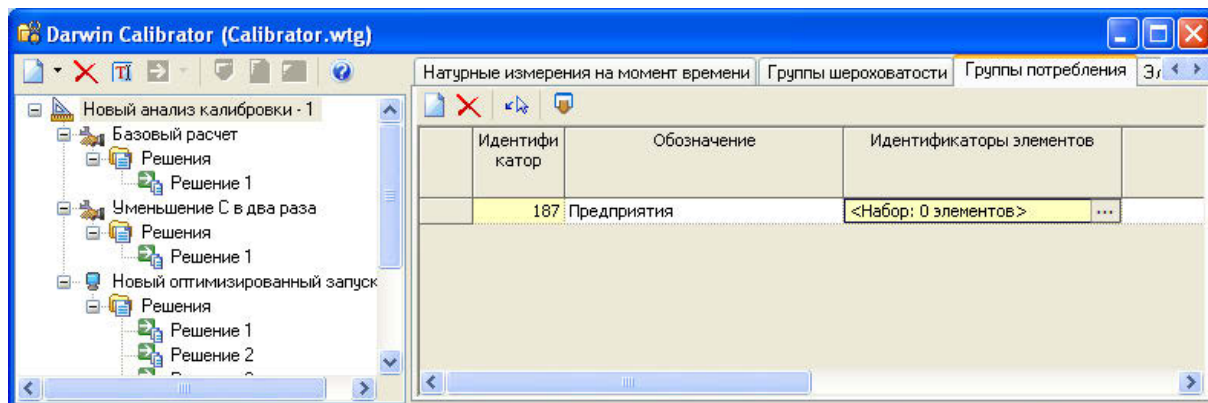


Рис. 7.35. Создание группы потребления

Нажмите кнопку в поле *Идентификаторы элементов*. Вы увидите уже знакомое окно *Выбранный набор*. Нажмите кнопку – *Выбрать из схемы*. Щелкните по узлам J-2, J-10, J-13, J-16, J-22, J-27, J-28 и J-30.

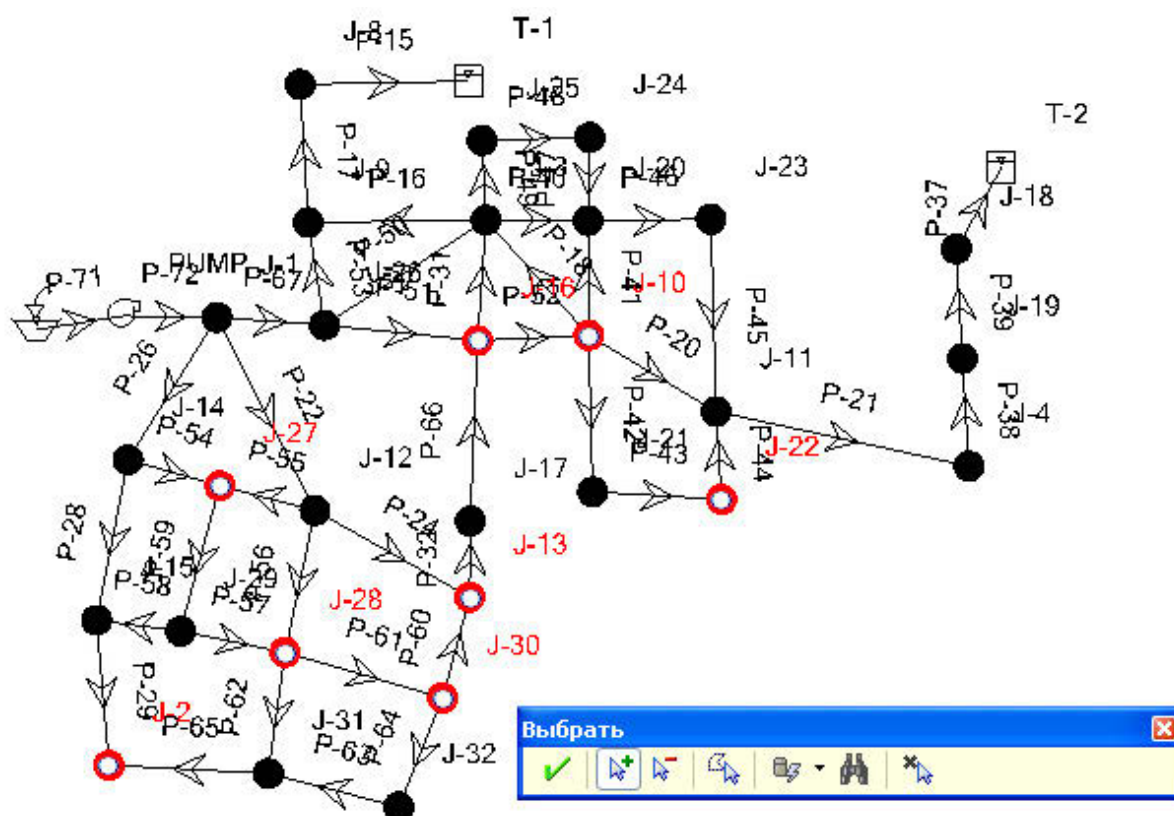






Рис. 7.36. Узлы, включаемые в группу «Предприятия»




Завершите процедуру выбора кнопкой  на плавающей панели.

Убедитесь, что список в окне *Выбранный набор* соответствует заданному перечню узлов (рис. 7.37).

Создайте вторую группу потребления *Население*. Нажмите кнопку  в поле *Идентификаторы элементов*, а далее кнопку  в окне *Выбранный набор*. С целью выделения требуемых узлов рекомендуем поступить так:

- выделите курсором все узлы сети;
- нажмите  – *Удалить* на плавающей панели;
- щелкните по узлам, отнесенным к группе *Предприятия*: J-2, J-10, J-13, J-16, J-22, J-27, J-28 и J-30 (рис. 7.38).

Завершите процедуру выбора кнопкой  на плавающей панели. Убедитесь, что группа *Население* содержит 21 узел (рис. 7.39).

Выбранный набор: Предприятия

	Обозначение	Идентификатор элемента
105	J-16	105
102	J-10	102
92	J-13	92
115	J-2	115
114	J-22	114
109	J-27	109
101	J-28	101
93	J-30	93

Рис. 7.37. Узлы, включаемые в группу «Предприятия»

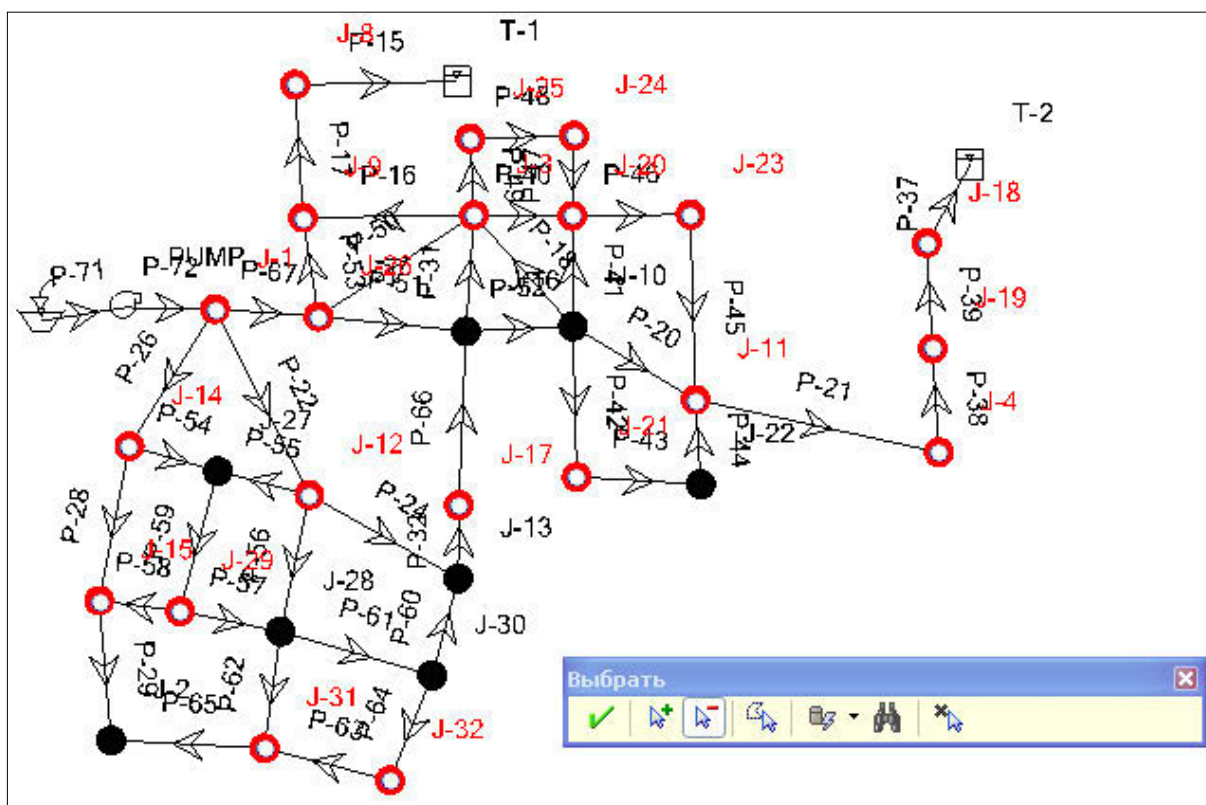


Рис. 7.38. Узлы, включаемые в группу «Население»

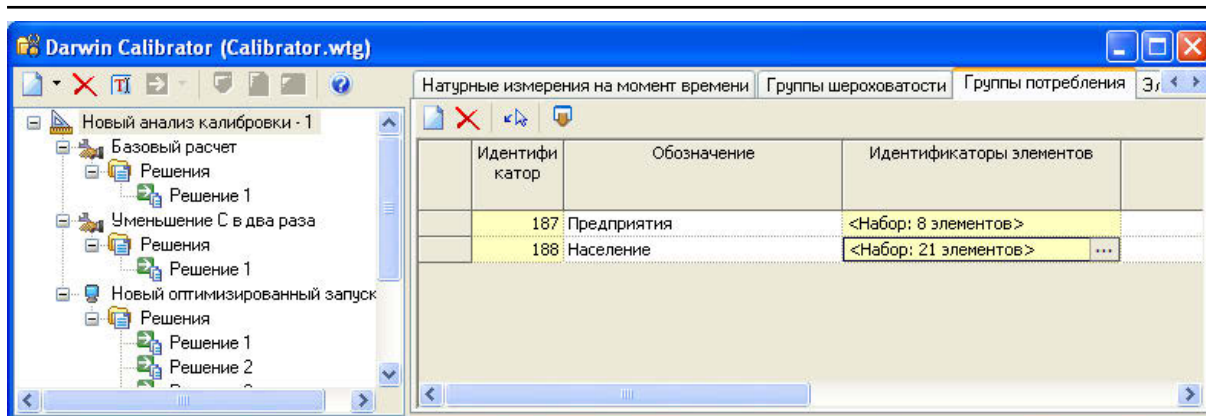


Рис. 7.39. Группы потребления

Создайте *Новый оптимизированный запуск - 2* и задайте опции в соответствии с рис. 7.40 (максимальное число проб – 50000, оставляемые решения – 4).

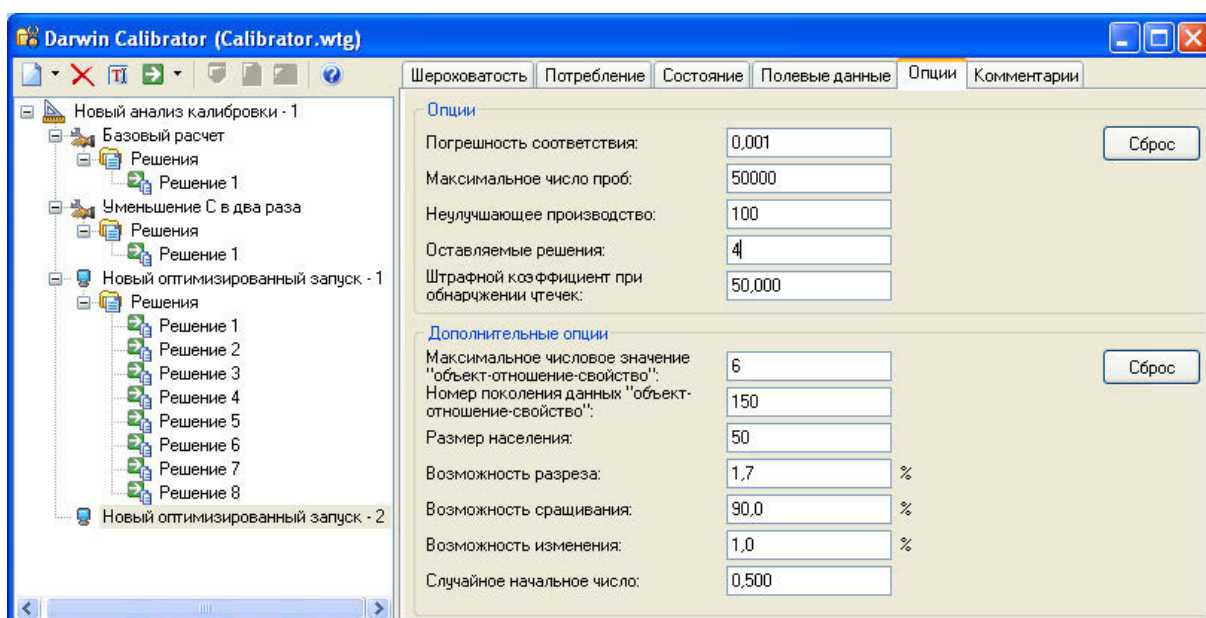


Рис. 7.40. Параметры запуска

На вкладке *Потребление* убедитесь, что минимальное и максимальное значения множителя равны соответственно 0,5 и 1,5, а шаг его изменения равен 0,1.

Установите курсор на пункт *Новый оптимизированный запуск - 2* на левой панели и запустите расчет. Его результаты вы найдете в графе *Оптимизация 2* сводной таблицы (п. 7.4.7).

Обратите внимание, что разница между опытными и смоделированными напорами теперь не превышает 0,5 м. Об этом свидетельствует и график (рис. 7.41).

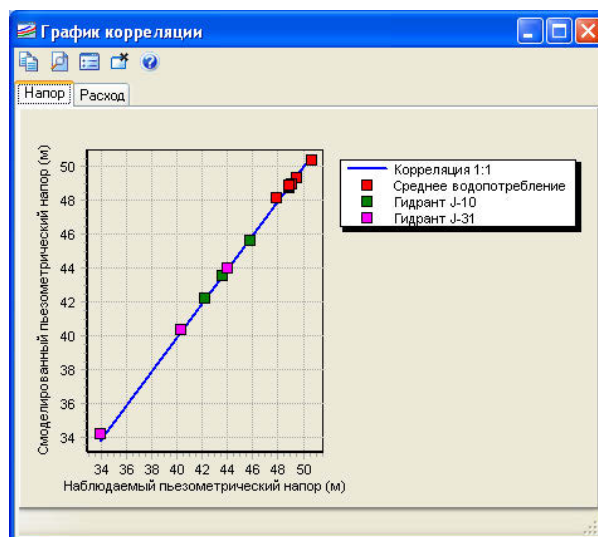



Рис. 7.41. Результаты оптимизации в виде графика

#### 7.4.6. Экспорт результатов расчетов в модель

После завершения калибровки наилучшие результаты можно экспортировать в расчетную схему (точнее – в отдельный сценарий). В нашем случае это *Решение 1* при *Новом оптимизированном запуске* - 2.

Для экспортирования результатов установите курсор на данное решение (левая панель) и нажмите кнопку  – *Экспорт в сценарий*. В одноименном окне укажите желаемые наименования создаваемого сценария и альтернатив.

После сообщения об успешном создании сценария и альтернатив рекомендуем убедиться, что они действительно появились в соответствующих списках.

Рис. 7.42. Параметры экспорта

### 7.4.7. Сравнение результатов оптимизации

Таблица 7.1

#### Результаты калибровки сети

Узел	Измерен- ный напор (м)	Базовый расчет	Уменьше- ние $C$ в два раза	Оптимизация 1	Оптимизация 2
Среднее водопотребление					
J-1	50,6	50,6	53,7	50,5	50,3
J-2	47,9	49,2	49,6	49,3	48,1
J-4	48,8	48,8	48,7	48,8	48,7
J-8	48,8	48,9	49,0	48,9	48,8
J-12	49,4	49,7	51,1	49,6	49,3
J-13	49,1	49,4	50,2	49,3	48,9
J-23	48,8	49,0	49,2	49,0	48,8
J-32	48,8	49,4	50,2	49,3	48,9
PUMP (л/с)	42,8	43,0	39,28	43,1	43,1
Гидрант J-10					
J-1	45,7	47,4	45,2	46,1	45,6
J-10	42,1	44,4	33,9	42,8	42,2
J-13	43,6	45,8	39,3	44,4	40,4
PUMP (л/с)	48,1	46,5	48,6	47,8	47,8
Гидрант J-31					
J-1	43,9	45,9	40,9	44,6	44,0
J-13	40,2	42,9	29,6	39,7	40,4
J-31	33,8	37,9	11,6	32,4	34,3
PUMP (л/с)	49,8	48,0	52,8	49,3	49,3

---

## 8. Анализ потребления энергии

### 8.1. Постановка задачи

Обеспечение энергетической эффективности сети водоснабжения – одна из основных задач предприятий «Водоканал». Минимизация потребления электроэнергии может быть достигнута только при правильном выборе насосных агрегатов и правильном регулировании их мощности при изменении параметров сети.

Насосы подбирают таким образом, чтобы при обеспечении требуемых напоров и водопотребления рабочая точка лежала в области максимальных КПД. Вследствие изменения водопотребления в течение времени (суток, недели, года) рабочая точка смещается и может выходить за пределы рабочей области насоса.

С целью уменьшения смещения рабочей точки применяют регулирующие емкости (водонапорные башни и колонны, гидропневматические аккумуляторы), используют несколько насосных агрегатов, включая или отключая некоторые из них при изменении водопотребления, применяют насосы с переменной частотой вращения рабочего колеса (с частотным регулированием).

Выбор того или иного способа регулирования сети с учетом неравномерности водопотребления оказывается в ряде случаев непростой задачей. В этом разделе на конкретном примере средствами WaterGEMS будет проанализирована энергетическая эффективность нескольких способов подачи воды в сеть.

Далее будет использоваться проект *eps.wtg* (предоставлен фирмой Bentley). Схема сети показана на рис. 8.1. Подача воды осуществляется двумя одинаковыми параллельными насосами РМР-4 и РМР-5.

В первом варианте в сети имеется регулирующая емкость (водонапорная башня) Т-1 и осуществляется дискретное (включено / выключено) управление насосами в зависимости от уровня воды в емкости.

Во втором варианте водонапорной башни нет. Один насос работает постоянно, а другой включается лишь в часы наибольшего водопотребления.

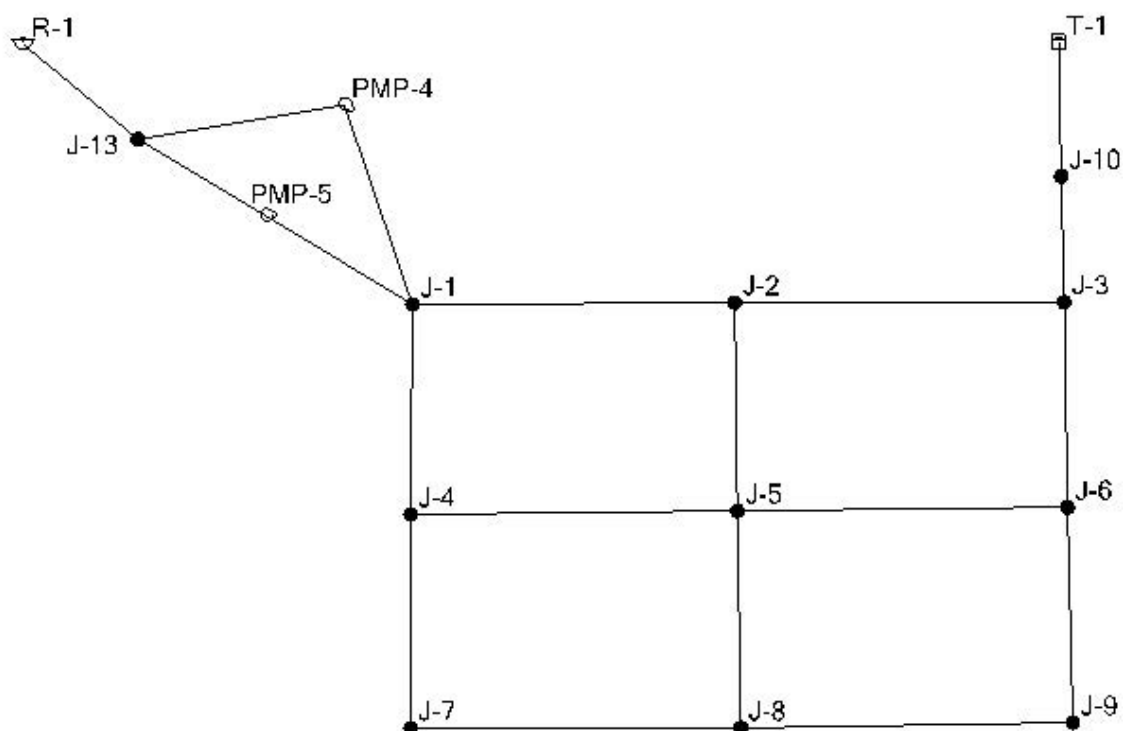



Рис. 8.1. Схема сети

Третий вариант также не предусматривает использование водонапорной башни. Один насос имеет переменную скорость вращения (частотное регулирование). Его задача – поддерживать требуемый напор на входе в сеть при любом водопотреблении. Второй насос нерегулируемый и включается только в периоды наибольшего водопотребления, как и в предыдущем случае.

Исходный файл проекта уже содержит все основные сведения об элементах сети (узловые отборы, характеристики насосов, параметры регулирующей емкости и т. д.). Сохраните его в своей папке.

До начала анализа необходимо ввести ряд дополнительных данных в соответствии с указанными вариантами.

Сначала введите график потребления. Для этого воспользуйтесь пунктом меню *Компоненты – Графики*.

В окне *Графики* с помощью кнопки  создайте новый гидравлический *Почасовой* график (табл. 8.1, рис. 8.2).

Следующим шагом установите соответствие между узловыми отборами и введенным графиком. С этой целью активизируйте пункт меню **Инструменты – Центр управления потреблением**. В одноименном окне щелчком правой клавиши на колонке *График (потре-*



бление) откройте контекстное меню и выберите пункт *Глобальное редактирование*. Установите *Почасовой* график (рис. 8.3).

Таблица 8.1

Коэффициенты неравномерности водопотребления

Час	Множитель
3	1,0
6	1,2
9	1,4
12	1,2
15	1,0
18	0,8
21	0,6
24	0,8

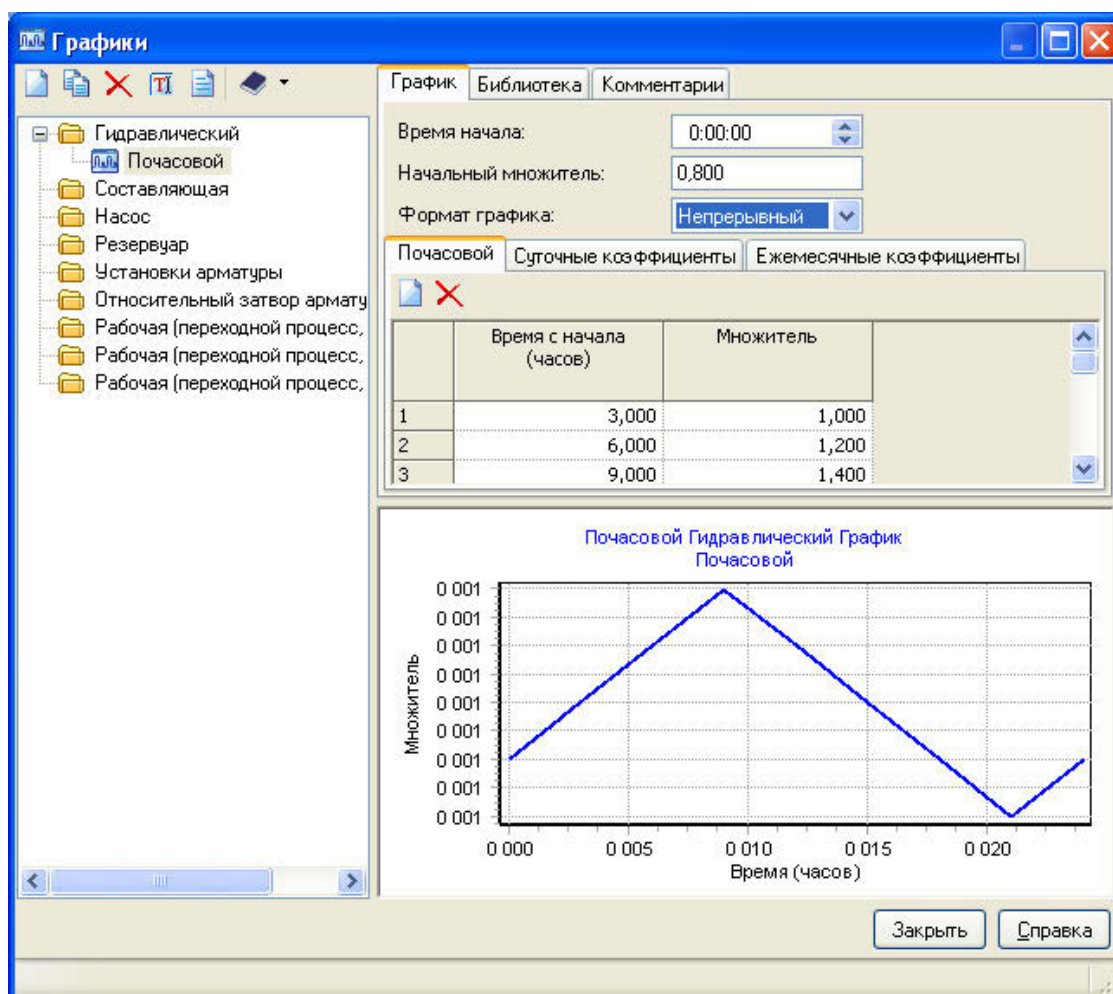


Рис. 8.2. График водопотребления

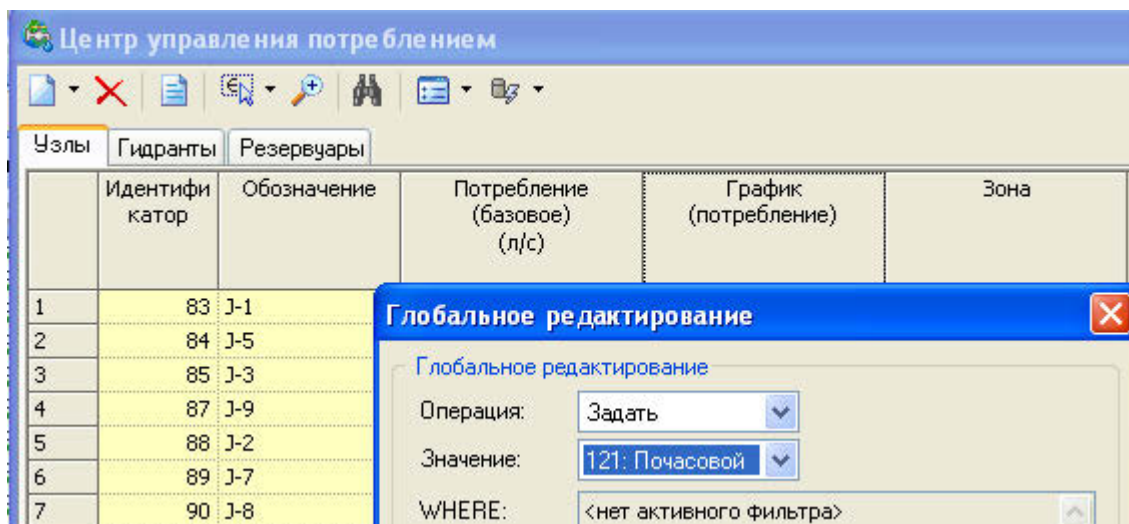


Рис. 8.3. Центр управления потреблением

Как отмечалось, проект уже содержит характеристики насосов, но некоторые их параметры следует ввести.

С помощью пункта меню **Компоненты – Определения насоса** откройте окно *Характеристики насоса* и перейдите на вкладку *Эффективность насоса* RMP-4.

В поле *Эффективность насоса* выберите *Точка КПД* и введите значение подачи при оптимальном КПД 75 %, которая в данном случае составляет 657,2 л/с (рис. 8.4).

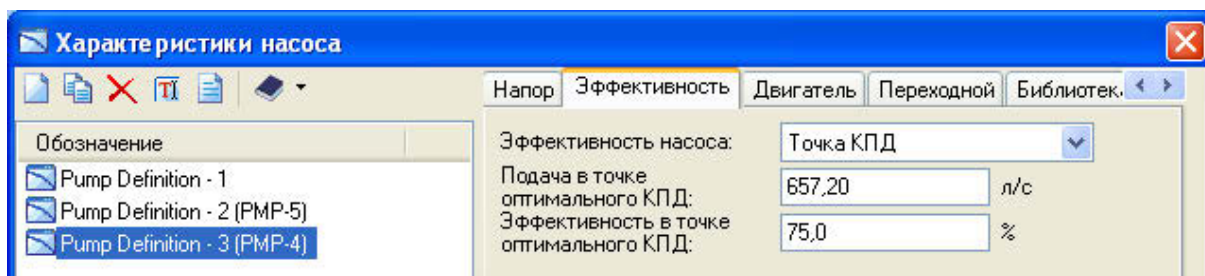


Рис. 8.4. Ввод КПД насоса

На вкладке *Двигатель* введите его КПД 95 % (рис. 8.5).

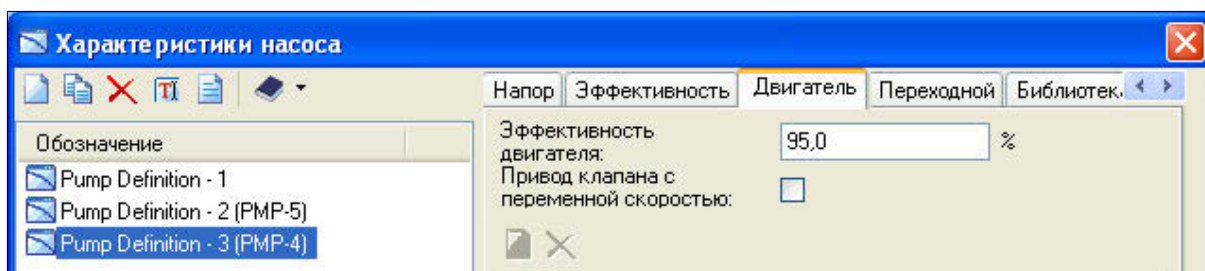
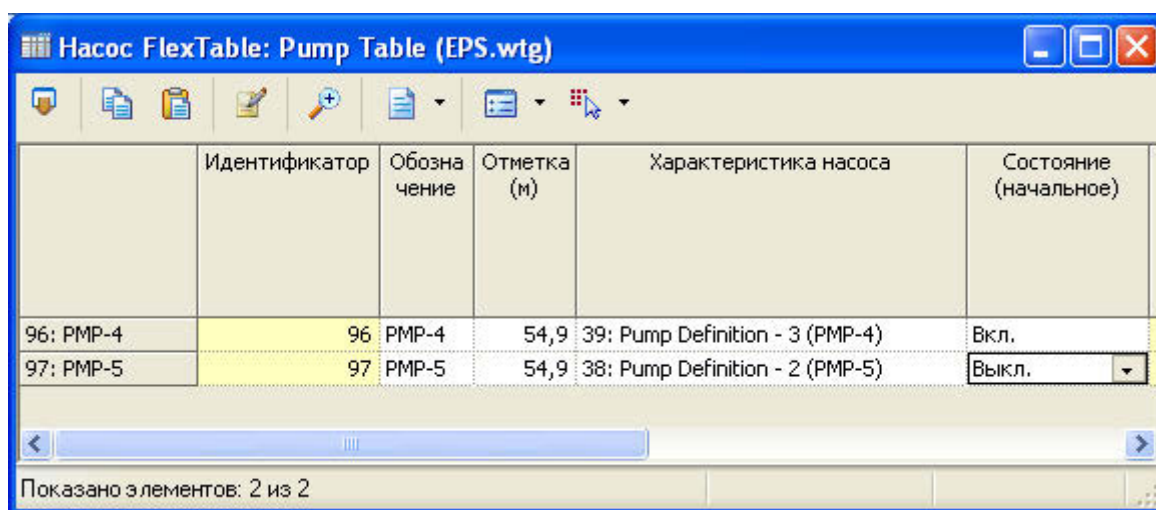


Рис. 8.5. Ввод КПД двигателя


Введите аналогичные параметры для насоса РМР-5. Далее откройте таблицу *Насос* и укажите, что в начальный момент насос РМР-4 включен, а насос РМР-5 выключен (рис. 8.6).



	Идентификатор	Обозначение	Отметка (м)	Характеристика насоса	Состояние (начальное)
96: РМР-4	96	РМР-4	54,9	39: Pump Definition - 3 (РМР-4)	Вкл.
97: РМР-5	97	РМР-5	54,9	38: Pump Definition - 2 (РМР-5)	Выкл.

Показано элементов: 2 из 2

Рис. 8.6. Таблица параметров насосов

Перед началом расчетов необходимо установить их параметры. Нажмите кнопку  или откройте пункт меню **Анализ – Опции расчета**. Создайте новый расчет *24 часа* (рис. 8.7).

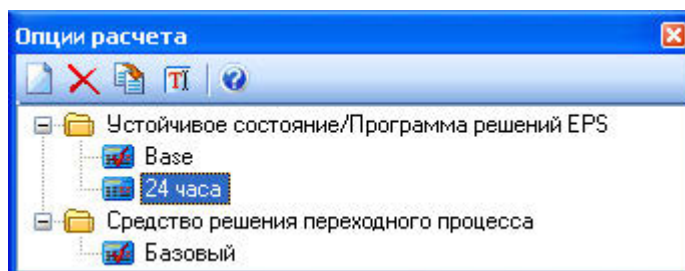


Рис. 8.7. Новый расчет

Двойным щелчком откройте окно его свойств. В разделе *Время расчета* введите (рис. 8.8):

*Тип временного анализа ... ESP*  
*Продолжительность ..... 24 часа*



Обозначение	24 часа
Комментарии	
Метод сопротивления	Формула Хазен-Вильямса
Набор выбора вывода	<Все>
Тип расчета	Только гидравлика
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Время расчета</b>	
Базовая дата	15.11.2010
Тип временного анализа	EPS
Время начала	0:00:00
Продолжительность (часов)	24,000
Гидравлический такт (часов)	1,000

Рис. 8.8. Свойства расчета

## 8.2. Нерегулируемые насосы и водонапорная башня

Очень часто регулирование производительности насосных станций осуществляют путем параллельного включения нескольких насосов. Графический метод построения суммарной характеристики двух параллельно включенных насосов иллюстрирует рис. 8.9. Он заключается в сложении абсцисс точек двух графиков с одной ординатой (для большей наглядности на рисунке показаны отличающиеся характеристики насосов).

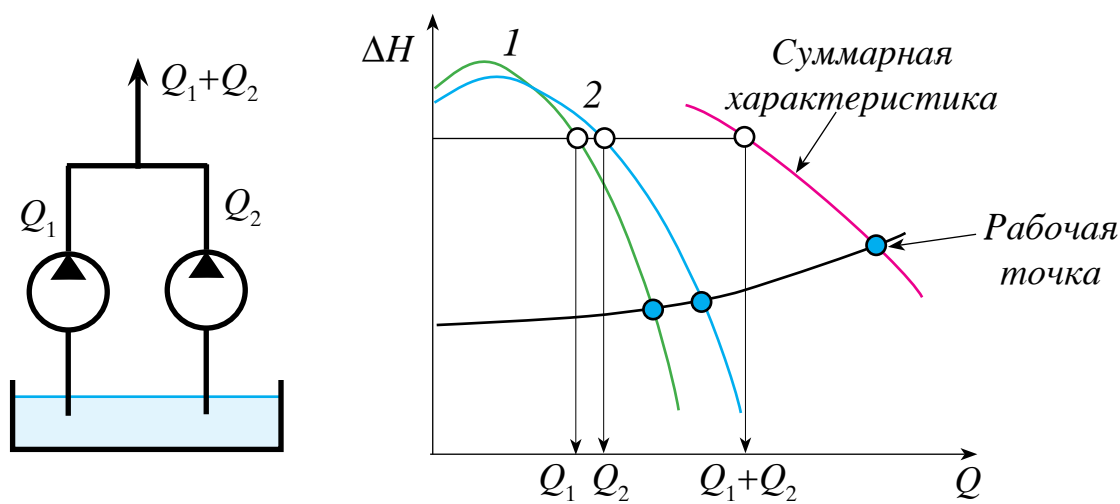


Рис. 8.9. Построение суммарной характеристики при параллельном включении двух насосов

WaterGEMS может определять рабочую точку при любом количестве параллельно работающих насосов.

В рассматриваемом проекте с целью экономии электроэнергии предполагается следующая схема управления насосами:

- если уровень в емкости Т-1 больше 109 м, насосы выключены;
- если уровень опускается ниже 107 м, включается насос РМР-4;
- если уровень продолжает снижаться и опускается ниже 105 м, то включается и насос РМР-5.

При повышении уровня в емкости Т-1 в часы относительно небольшого водоразбора отключение насосов осуществляется по следующей схеме:

- если уровень воды в резервуаре достигает 108 м, отключается насос РМР-5;
- если уровень увеличивается до 109 м, то отключается и второй насос РМР-4.

Для удобства ввода данных представим эти условия в виде таблицы (табл. 8.2).

Таблица 8.2

Условия включения (отключения) насосов  
в зависимости от уровня воды резервуаре Т-1

Насос	Включен, если уровень меньше, чем	Выключен, если уровень больше, чем
PMP-4	107 м	109 м
PMP-5	105 м	108 м

Каждое из условий включения или отключения насосов может быть записано в виде логических выражений типа

ЕСЛИ <условие> ТО <действие>.

Например:

*ЕСЛИ уровень в резервуаре Т-1 больше 109 м ТО насос РМР-4 выключен.*

Программа WaterGEMS позволяет «автоматизировать» управление насосами и другим оборудованием с использованием подобных условий.

Откройте пункт меню **Компоненты – Элементы управления**. В одноименном окне перейдите на вкладку *Условия*. Именно здесь и следует ввести указанные выше условия включения или отключения насосов (рис. 8.10).

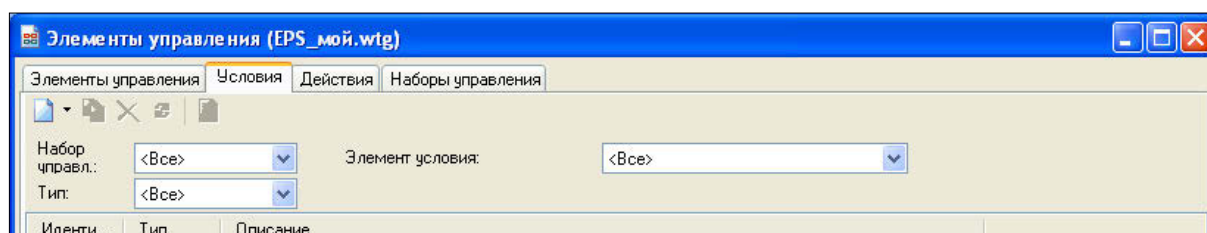



Рис. 8.10. Окно ввода логических условий ЕСЛИ

Количество элементов управления и условий может быть любым. Для ввода очередного условия следует нажать кнопку .

Создайте новое *простое* условие. В нижней части окна укажите (рис. 8.11):



Тип условия..... *Элемент*  
 Элемент..... *T-1*  
 Атрибут хранения..... *Пьезометрический напор*  
 Оператор..... *>*  
 Пьезометрический напор... *109*

Напоминаем, что для резервуара понятия «уровень воды» и «пьезометрический напор» – это одно и то же.

Рис. 8.11. Условие «ЕСЛИ уровень в резервуаре T-1 больше 109»

Иденти...	Тип	Описание
C123	Простой	{ "T-1" Пьезометрический напор > 109 м }
C124	Простой	{ "T-1" Пьезометрический напор > 108 м }
C125	Простой	{ "T-1" Пьезометрический напор < 107 м }
C126	Простой	{ "T-1" Пьезометрический напор < 105 м }

Рис. 8.12. Набор условий ЕСЛИ в соответствии с табл. 8.2

Аналогичным образом введите остальные условия (рис. 8.12). Для ускорения работы советуем воспользоваться кнопкой – *Дублировать*.

Далее перейдите на вкладку *Действия*. Здесь указываются действия, следующие за словами *ТО* в логических выражениях.

С помощью кнопки создайте новое *простое* действие (рис. 8.13). В нижней части окна укажите:


Элемент (кнопка )... *RMP-4*  
 Атрибут насоса..... *Состояние насоса*  
 Оператор..... *=*  
 Состояние насоса..... *Вкл.*

Рис. 8.13. Действие «ТО насос RMP-4 включен»



Аналогичным образом введите остальные действия (рис. 8.14).

Теперь необходимо установить соответствия между условиями и действиями.

Перейдите на вкладку *Элементы управления* и нажмите кнопку  – *Создать*.

В нижней части окна на вкладке *Управление* установите связь (рис. 8.15):

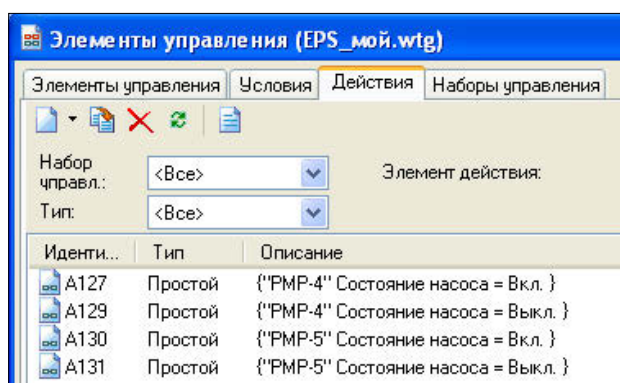


Рис. 8.14. Набор действий ТО в соответствии с табл. 8.2

*ЕСЛИ пьезометрический напор T-1 > 109 м ЗАТЕМ РМР-4 = Выкл.*

Обратите внимание, что здесь слово *ЗАТЕМ* аналогично слову *ТО* в логических условиях. Действия и условия выбирайте из раскрывающихся меню.

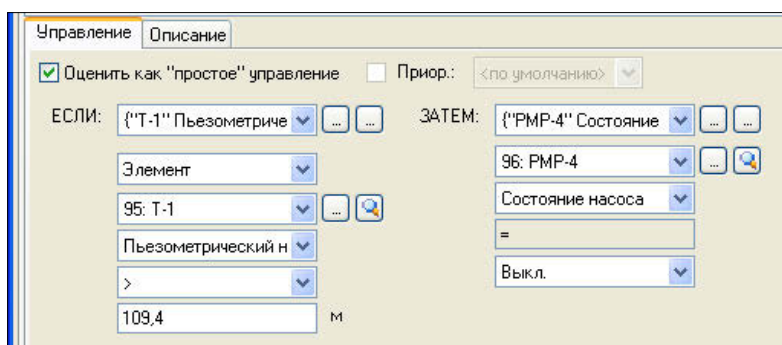


Рис. 8.15. Условие управления «ЕСЛИ пьезометрический напор T-1 > 109,4 м ЗАТЕМ РМР-4 = Выкл.»

Аналогичным образом установите другие соответствия (рис. 8.16):

*ЕСЛИ пьезометрический напор T-1 < 107 м ЗАТЕМ РМР-4 = Вкл.*

*ЕСЛИ пьезометрический напор T-1 < 105 м ЗАТЕМ РМР-5 = Вкл.*

*ЕСЛИ пьезометрический напор T-1 > 108 м ЗАТЕМ РМР-5 = Выкл.*

В каждом конкретном проекте можно заранее сформировать множество логических условий, которые будут использоваться при различных сценариях.

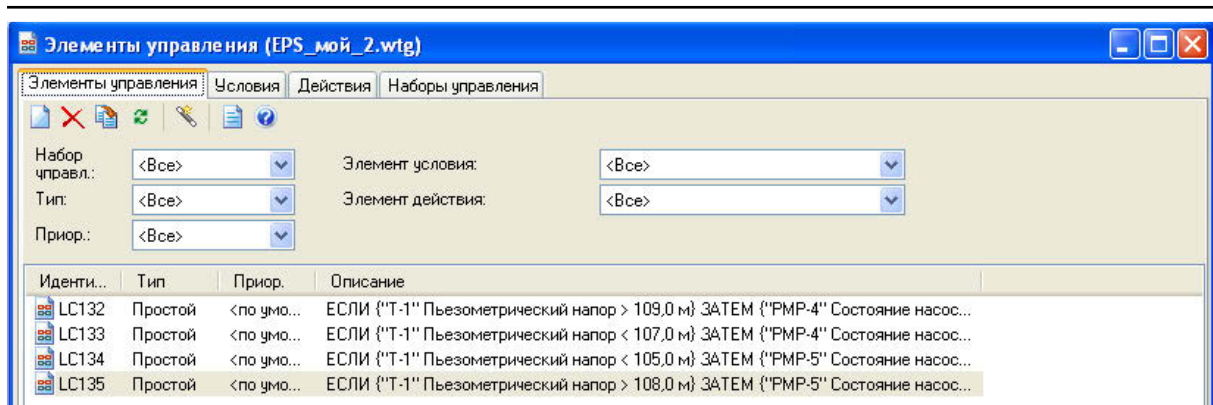



Рис. 8.16. Набор логических выражений в соответствии с табл. 8.2

В нашем первом сценарии используются все введенные условия, поэтому программе следует дать соответствующее указание.

Перейдите на вкладку *Наборы управления* и нажмите кнопку  – *Создать*. При этом откроется окно *Набор логического контроля* (рис. 8.17).

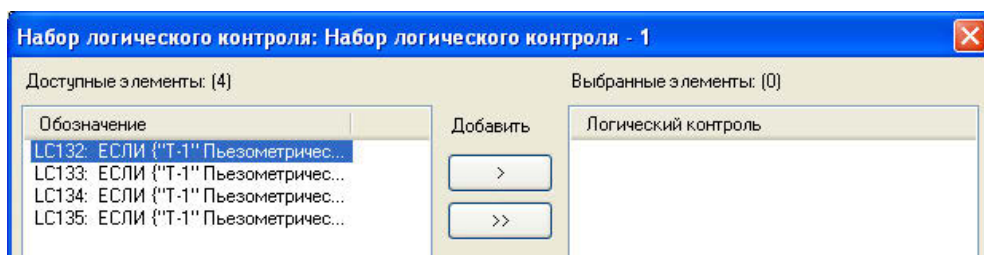


Рис. 8.17. Окно наборов управления

Кнопками *Добавить* перенесите все условия на правую панель и нажмите кнопку *ОК*. Можете переименовать *Обозначение* набора (рис. 8.18.).

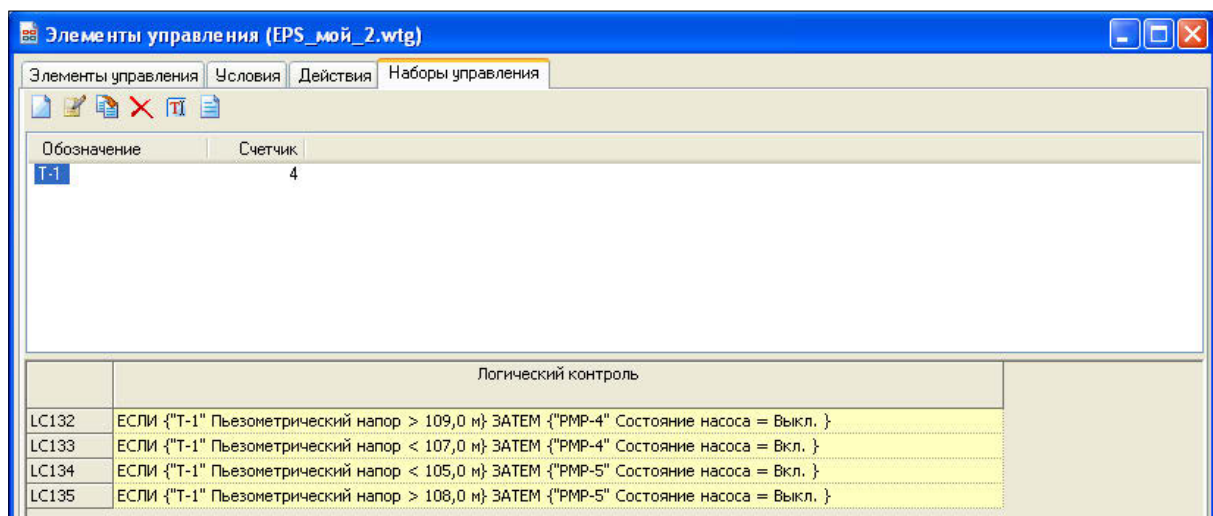



Рис. 8.18. Набор управления T-1

На этом ввод условий завершается. Закройте окно *Элементы управления* и сохраните проект.

Следующий шаг – создание новой альтернативы и сценария. Нажмите кнопку  для открытия окна менеджера альтернатив. Создайте новую альтернативу в группе *Рабочий*. Сразу переименуйте ее (рис. 8.19).

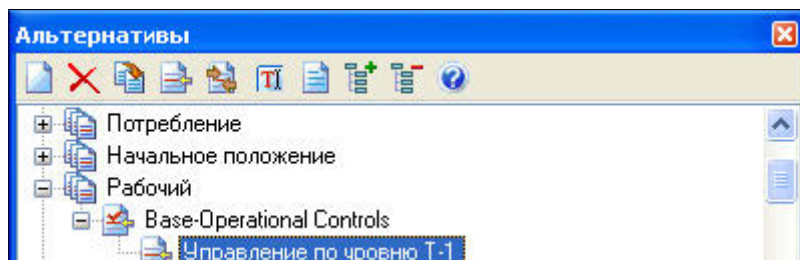


Рис. 8.19. Новая альтернатива

Двойным щелчком откройте окно ее свойств. В качестве набора управления укажите созданный ранее набор логических условий (рис. 8.20).

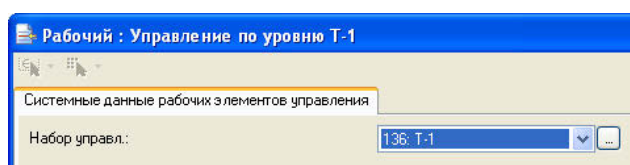


Рис. 8.20. Указание набора управления для альтернативы

Создайте новый сценарий и сразу объявите его текущим.

Двойным щелчком откройте окно его свойств. Задайте созданную ранее альтернативу в качестве *Рабочей*. В группе *Опции расчета* задайте 24 часа (рис. 8.21).

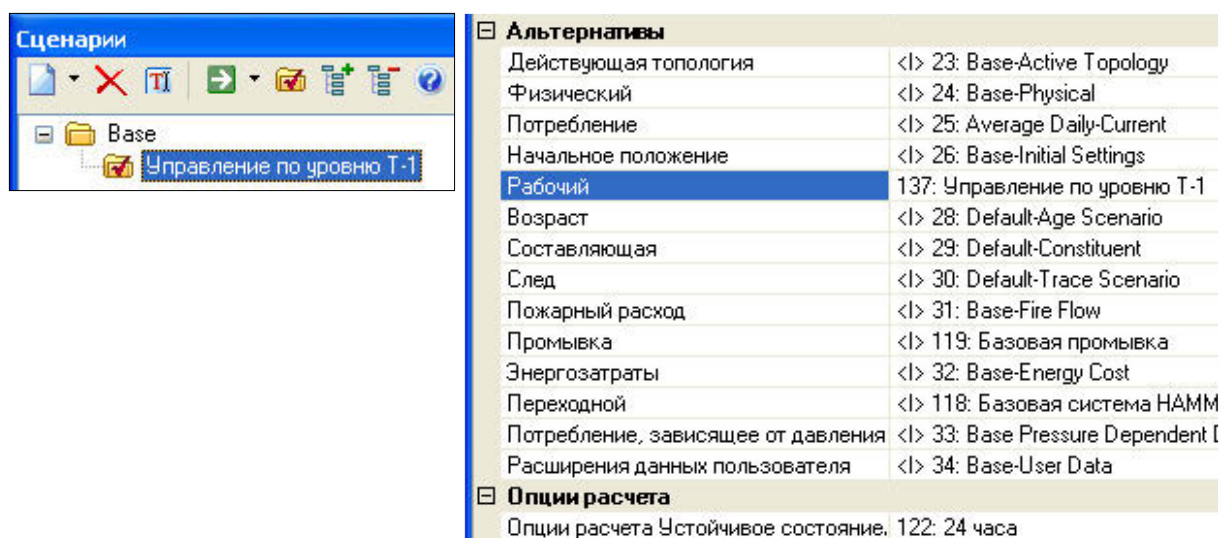


Рис. 8.21. Новый сценарий и его свойства

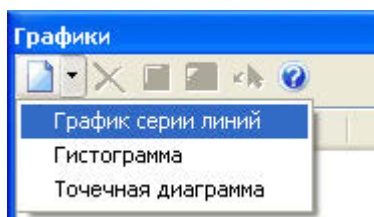



Рис. 8.22. Окно графиков

Закройте окно опций, сохраните проект и выполните расчет.

Результаты расчета удобно анализировать с помощью графиков. Нажмите кнопку  – *График* и создайте новый *График серии линий* (рис. 8.22).

Постройте самостоятельно графики изменения давлений в узлах J-1, J-3 и J-9 (рис. 8.23).

Резкие изменения давления происходят в моменты включения и отключения насосов.

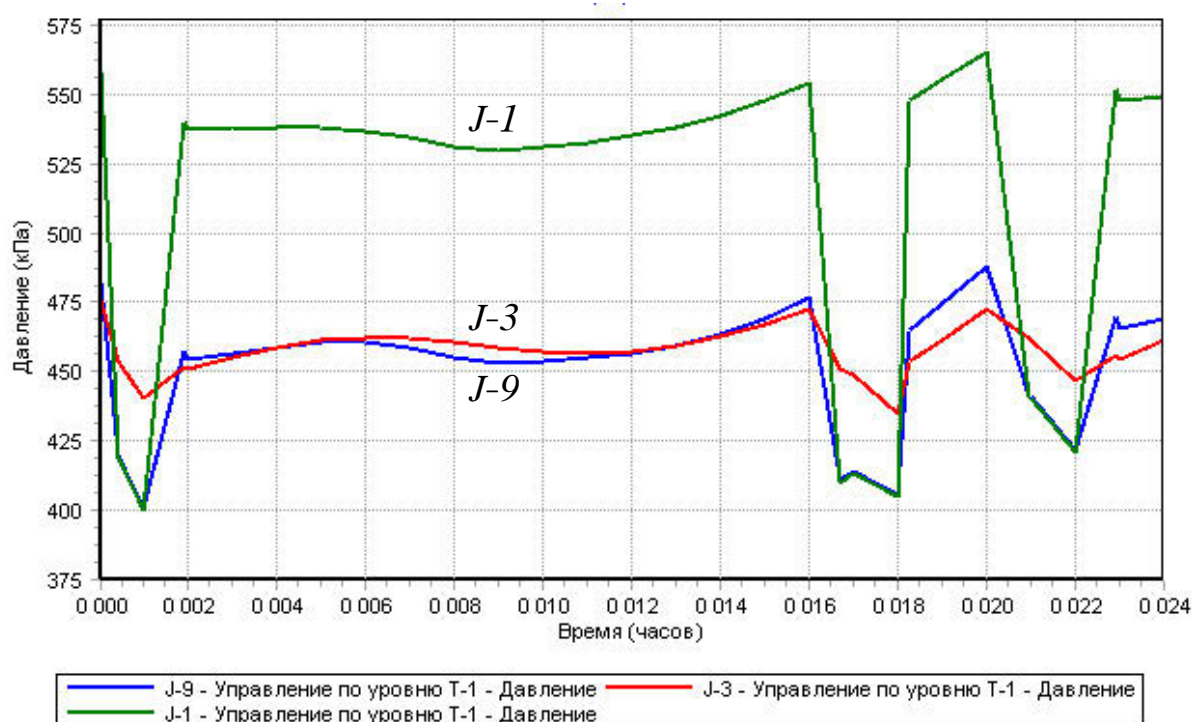


Рис. 8.23. Графики изменения давлений в узлах J-1, J-3 и J-9

Зафиксируйте минимальное и максимальное значение напора в узле J-1 с целью последующего сравнения с другими вариантами (см. п. 8.6).

### 8.3. Нерегулируемые насосы без водонапорной башни

Как указывалось, необходимо проанализировать работу сети при отсутствии регулирующего резервуара Т-1 и при постоянной частоте вращения насосов.



Насос РМР-4 включен постоянно. Насос РМР-5 должен включаться, если потребление воды сетью (расход от резервуара R-1) превысит 657 л/с.

С целью повторения при необходимости предыдущего анализа создадим сценарий, использующий новые альтернативы.

Коль скоро теперь в сети будет отсутствовать водонапорная башня, меняется топология сети.

Создайте новую альтернативу в группе *Действующая топология*. Для удобства сразу переименуйте ее (рис. 8.24).

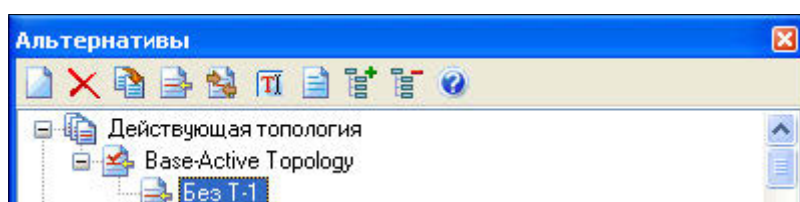


Рис. 8.24. Альтернативная топология

Двойным щелчком откройте окно свойств. На вкладке *Труба* отключите (деактивируйте) трубопровод Р-16, идущий к водонапорной башне Т-1 (рис. 8.25). На вкладке *Резервуар с регулируемым уровнем* отключите Т-1 (рис. 8.26).

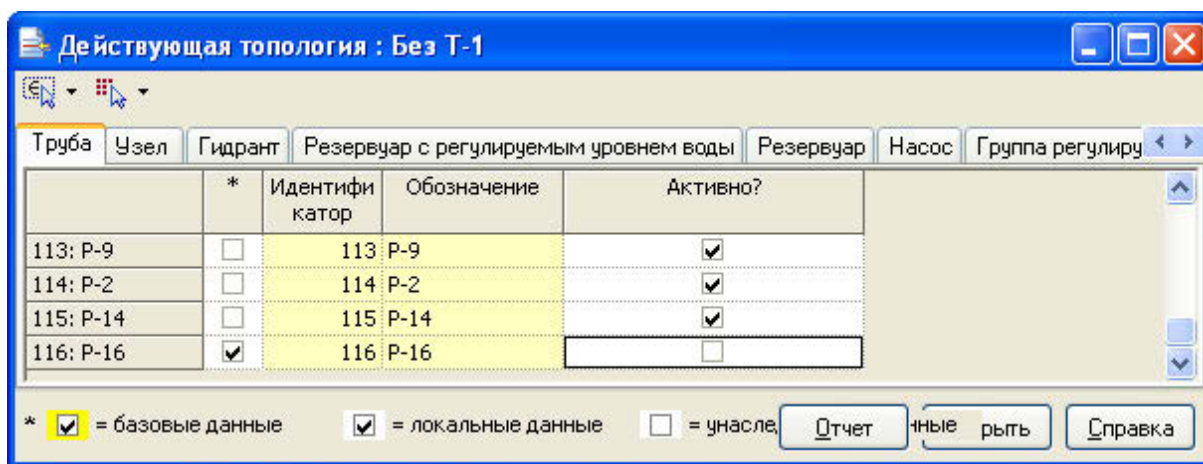


Рис. 8.25. Отключение трубопровода Р-16

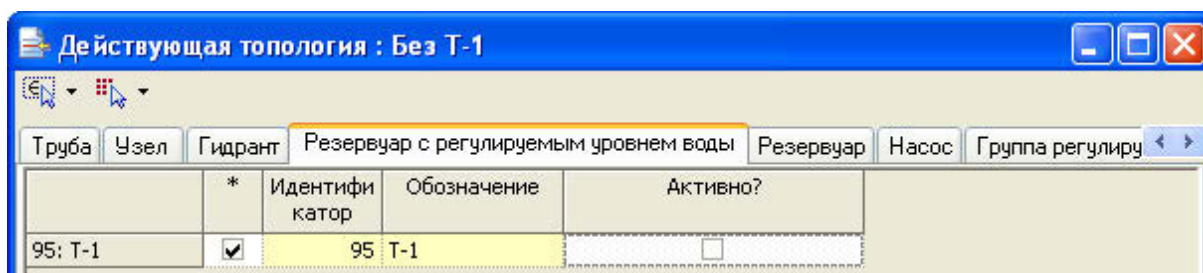


Рис. 8.26. Отключение резервуара Т-1

Завершите работу с менеджером альтернатив топологии.

Поскольку насос РМР-5 включается, если потребление воды превышает 657 л/с, необходимо создать новое логическое условие. С помощью пункта меню **Компоненты – Элементы управления** откройте одноименное окно. На вкладке *Условия* создайте новое простое условие, как показано на рис 8.27.

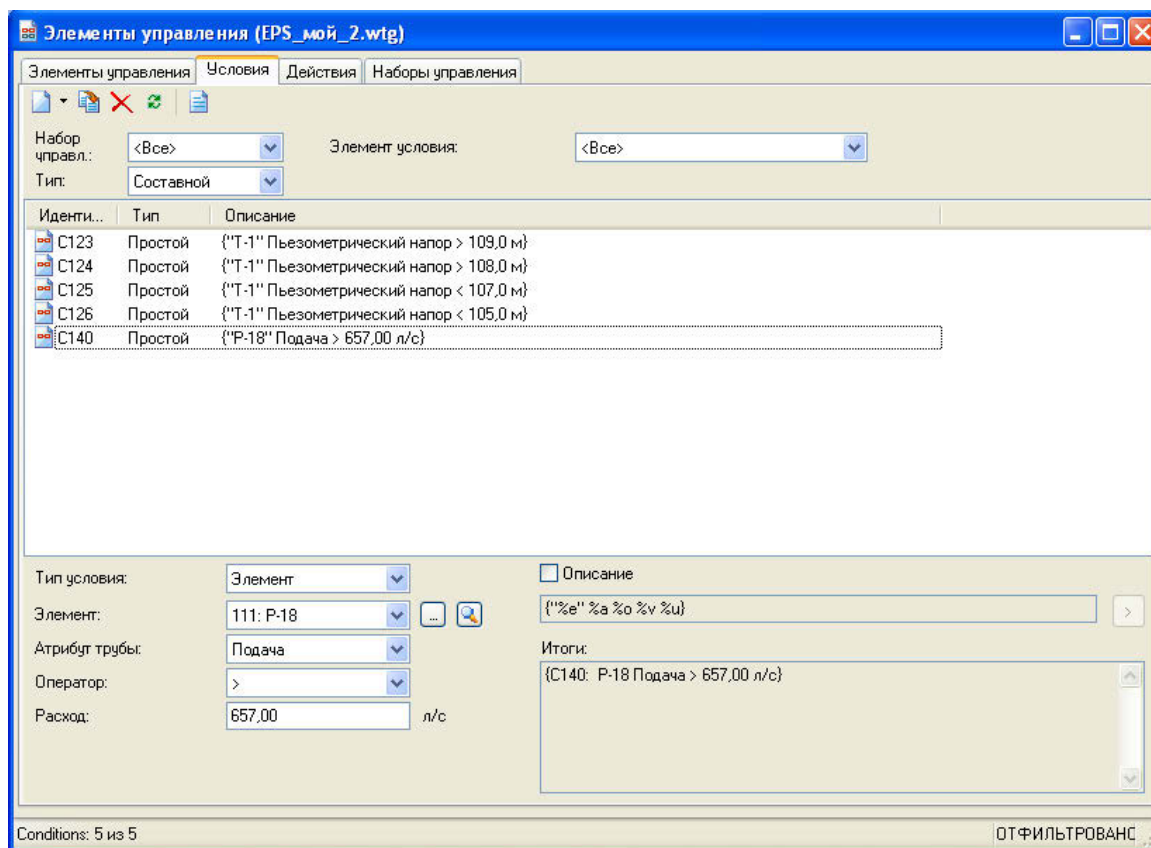


Рис. 8.27. Создание условия включения насоса РМР-5

Поскольку необходимое действие (РМР-5 включен) уже создано, перейдите сразу на вкладку *Элементы управления* и создайте новый логический элемент, показанный на рис. 8.28.

Далее перейдите на вкладку *Наборы управления* и создайте новый набор *Без Т-1*. Включите в него единственное, созданное только что, условие (рис. 8.29).

Закройте окно элементов управления и сохраните проект.

Создайте новую альтернативу *Без Т-1* в группе *Рабочий*. Двойным щелчком откройте окно ее свойств. В качестве набора управления задайте созданный только что набор логических условий (рис. 8.30).



Иденти...	Тип	Приор.	Описание
LC132	Простой	<по умо...	ЕСЛИ {"Т-1" Пьезометрический напор > 109,0 м} ЗАТЕМ {"PMP-4" Состояние насос...
LC133	Простой	<по умо...	ЕСЛИ {"Т-1" Пьезометрический напор < 107,0 м} ЗАТЕМ {"PMP-4" Состояние насос...
LC134	Простой	<по умо...	ЕСЛИ {"Т-1" Пьезометрический напор < 105,0 м} ЗАТЕМ {"PMP-5" Состояние насос...
LC135	Простой	<по умо...	ЕСЛИ {"Т-1" Пьезометрический напор > 108,0 м} ЗАТЕМ {"PMP-5" Состояние насос...
LC141	Логичес...	<по умо...	ЕСЛИ {"P-18" Подача > 657,00 л/с} ЗАТЕМ {"PMP-5" Состояние насоса = Вкл. } ИНА...

Управление

Описание

☐ Оценить как "простое" управление
 ☐ Приор.: <по умолчанию>
 ☒ Обладает ИНАЧЕ?

ЕСЛИ: {"P-18" Подача > 657

Элемент

111: P-18

Подача

>

657,00 л/с

ЗАТЕМ: {"PMP-5" Состояние

97: PMP-5

Состояние насоса

=

Вкл.

ИНАЧЕ: {"PMP-5" Состояние

97: PMP-5

Состояние насоса

=

Выкл.

Рис. 8.28. Новый элемент управления

Набор логического контроля: Без Т-1

Доступные элементы: (4)

Обозначение

LC132: ЕСЛИ {"Т-1" Пьезометричес...

LC133: ЕСЛИ {"Т-1" Пьезометричес...

LC134: ЕСЛИ {"Т-1" Пьезометричес...

LC135: ЕСЛИ {"Т-1" Пьезометричес...

Добавить

>

>>

Выбранные элементы: (1)

Логический контроль

LC141: ЕСЛИ {"P-18" Подача > 657,00 л/с} ЗАТЕ

Элементы управления (EPS\_мой\_2.wtg)

Элементы управления

Условия

Действия

Наборы управления

Обозначение

Счетчик

T-1 4

Без Т-1 1

Логический контроль

LC141 ЕСЛИ {"P-18" Подача > 657,00 л/с} ЗАТЕМ {"PMP-5" Состояние насоса = Вкл. } ИНАЧЕ {"PMP-5" Состояние насо...

Рис. 8.29. Новый набор логических условий

---

Создайте новый сценарий и сразу объявите его текущим.

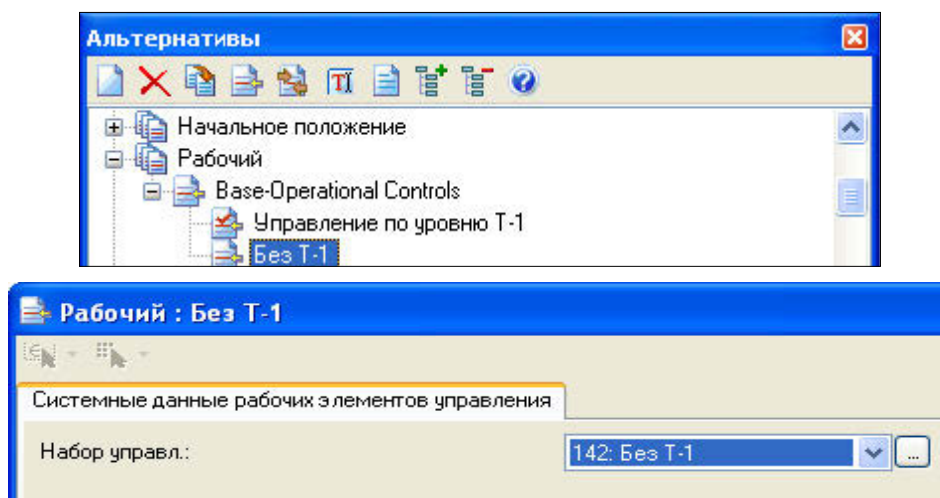


Рис. 8.30. Альтернатива «Без Т-1»

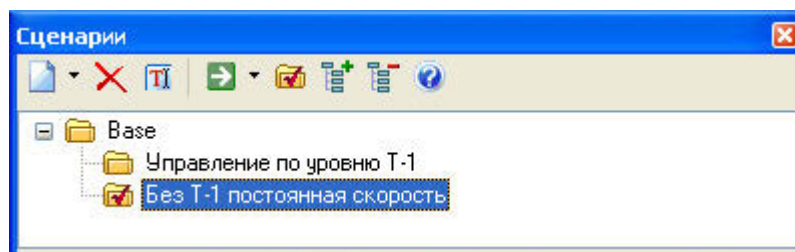


Рис. 8.31. Новый сценарий

Двойным щелчком откройте окно его свойств. Задайте созданную альтернативу *Без Т-1* в качестве *Рабочей*. Измените *Действующую топологию* на *Без Т-1*. В группе *Опции расчета* задайте *24 часа* (рис. 8.32).

Выполните расчет. Сохраните проект.

Зафиксируйте минимальное и максимальное значение напора в узле J-1 с целью последующего сравнения с другими вариантами (см. п. 8.6).

## 8.4. Использование регулируемого насоса

В третьем варианте регулирующая емкость тоже отключена. Насос РМР-4 должен иметь переменную скорость вращения (частотное регулирование) с целью поддержания постоянного напора 115,8 м на входе в сеть (узел J-1). Насос РМР-5 нерегулируемый и должен работать, как и во втором случае.

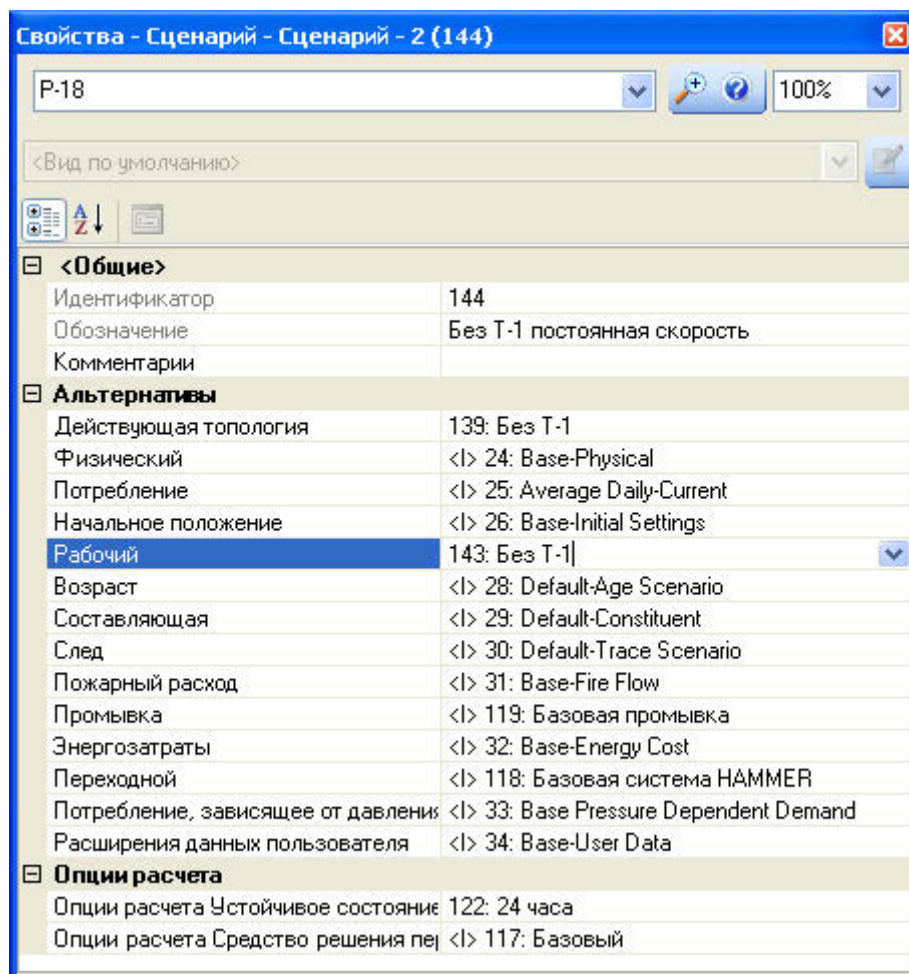


Рис. 8.32. Свойства сценария «Без T-1 постоянная скорость»

Регулирование производительности и напора насосов в настоящее время все чаще осуществляется путем изменения частоты их вращения. WaterGEMS осуществляет пересчет характеристик насоса при изменении частоты  $n$  с помощью законов пропорциональности (рис. 8.33):

– для производительности

$$Q_1 / Q_2 = n_1 / n_2;$$

– для напора

$$\Delta H_1 / \Delta H_2 = (n_1 / n_2)^2;$$

– для мощности

$$N_1 / N_2 = (n_1 / n_2)^3.$$

Топология сети будет такой же, как и в предыдущем случае. Изменения коснутся лишь насоса РМР-4.

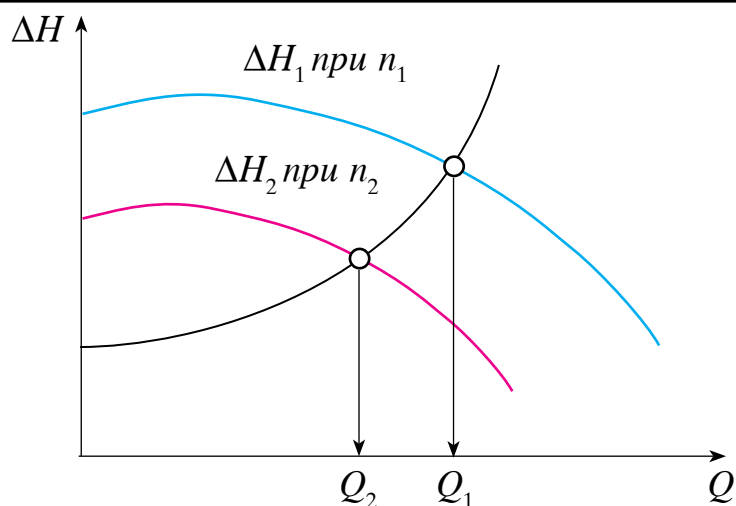


Рис. 8.33. Регулирование параметров насоса путем изменения частоты вращения

Создайте новую физическую альтернативу (рис. 8.34).



Рис. 8.34. Новая физическая альтернатива

Создайте новый сценарий *Переменная скорость* (сценарий создается на основе предыдущего) и объявите его текущим (рис. 8.35).

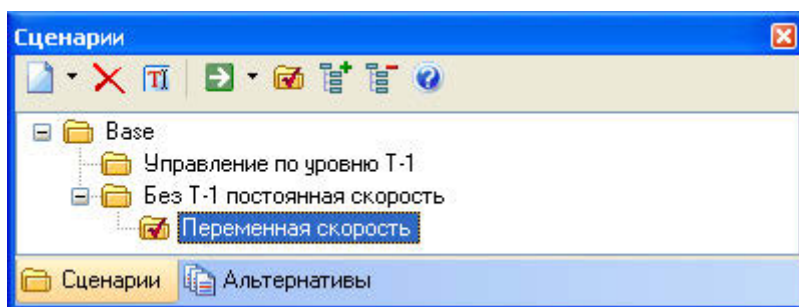


Рис. 8.35. Новый сценарий

Двойным щелчком откройте окно его свойств. Укажите в качестве физической альтернативы *Переменная скорость* (рис. 8.36).

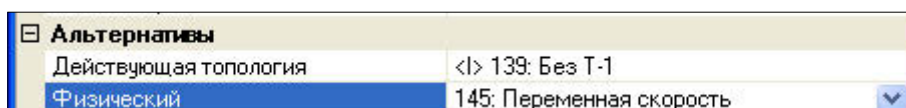


Рис. 8.36. Указание физической альтернативы

Двойным щелчком откройте окно свойств насоса РМР-4. В группе физических параметров укажите, что он является регулируемым. После этого появится возможность ввести дополнительные свойства (рис. 8.37):

Узел управления..... J-1  
 Пьезометрический напор..... 115,8 м  
 Коэффициент относительной скорости... 1,0

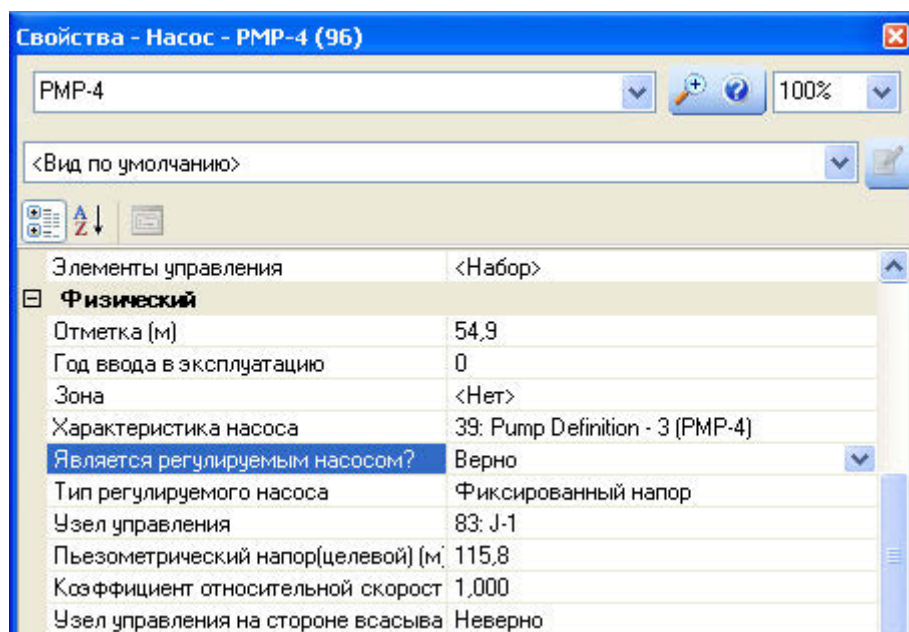


Рис. 8.37. Свойства регулируемого насоса

Сохраните проект и выполните расчет.

Зафиксируйте минимальное и максимальное значение напора в узле J-1 с целью последующего сравнения с другими вариантами (см. п. 8.6).

Обратите внимание, что WaterGEMS позволяет осуществлять сравнение результатов расчета по различным вариантам в графическом виде. Для этого достаточно отметить требуемые сценарии в окне опций серии графиков (рис. 8.38).

## 8.5. Анализ энергопотребления

В данной части работы сравним три рассмотренных способа управления насосами с точки зрения их энергетической эффективности.



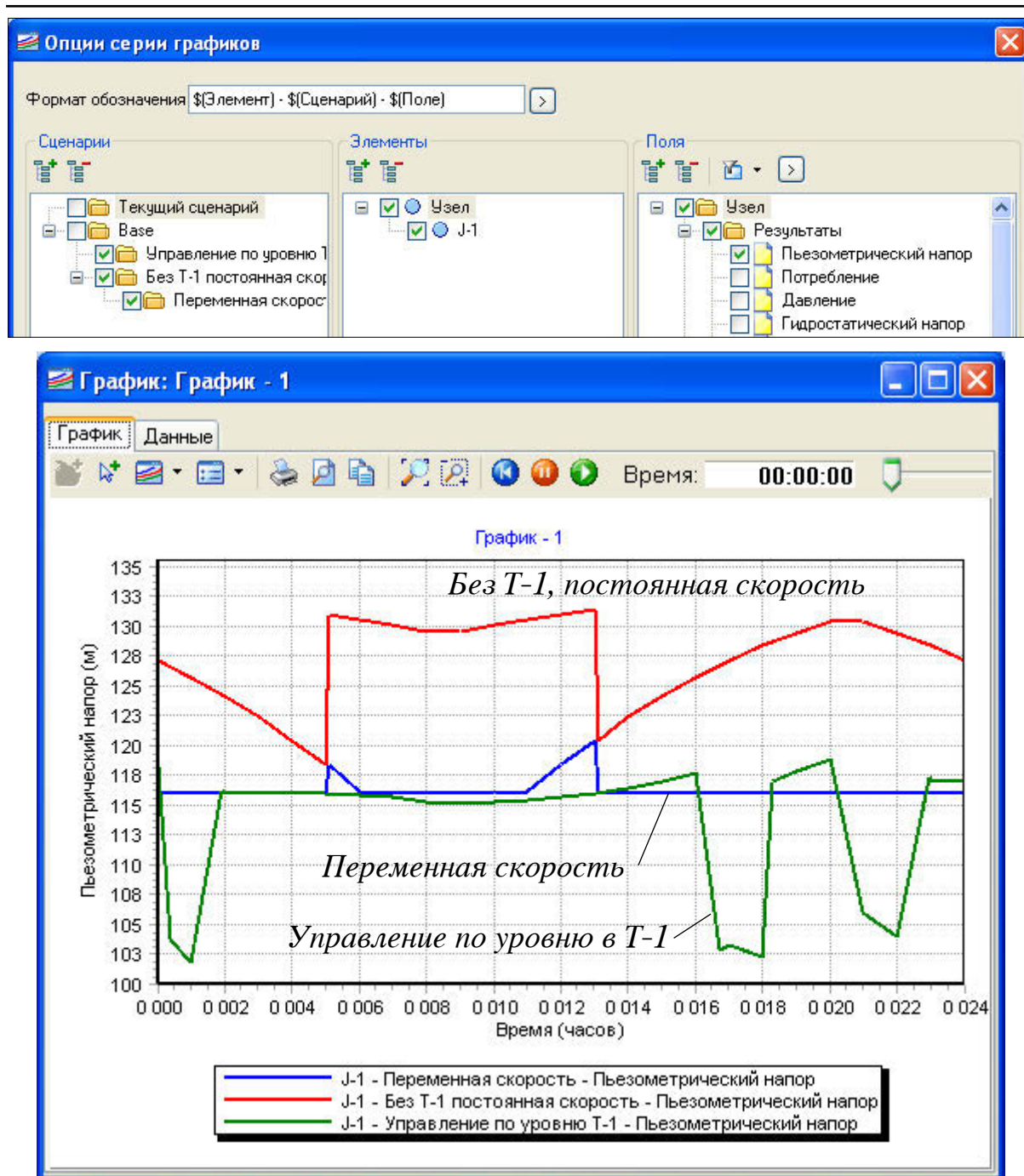


Рис. 8.38. Изменение напора в узле J-1 при различных сценариях

Активизируйте пункт меню **Анализ – Энергозатраты**. В одноименном окне нажмите кнопку – **Установление стоимости энергии**. Введите постоянную во времени стоимость электроэнергии, например 0,1 за кВт×ч (рис. 8.39).

В окне **Энергозатраты** укажите сценарий **Управление по уровню T-1** и выполните расчет (рис. 8.40).

Выполните аналогичные расчеты для двух других сценариев.



**Установка стоимости энергии**

Обозначение: Energy Pricing - 1

**Плата при пиковом потреблении**

☐ Включать плату при пиковом потреблении?

Плата при пиковом потреблении: 0,0 p./kWt

Биллинговый период: 720,000 часов

**Установление стоимости энергии**

Запуск стоимости энергии: 0,10 p./kWt-час

	Время с начала (часов)	Стоимость энергии (p./kWt-час)
1	24,000	0,10

Рис. 8.39. Ввод стоимости электроэнергии

**Энергозатраты**

Сценарий: 138: Управление по уровню Т-1

Суточные затраты: 1 014,8 p.

Затраты на использование: 1 014,8 p.

Общая использованная энергия: 0,1986 кВт.ч/куб. м

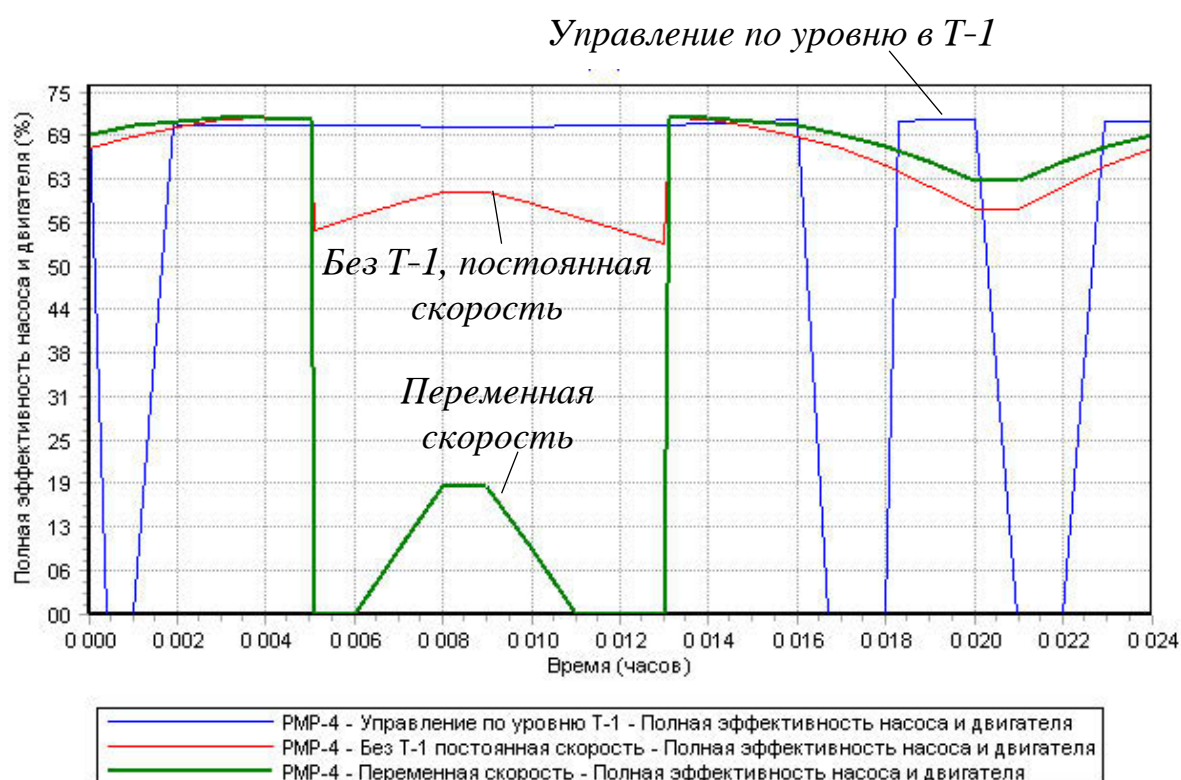
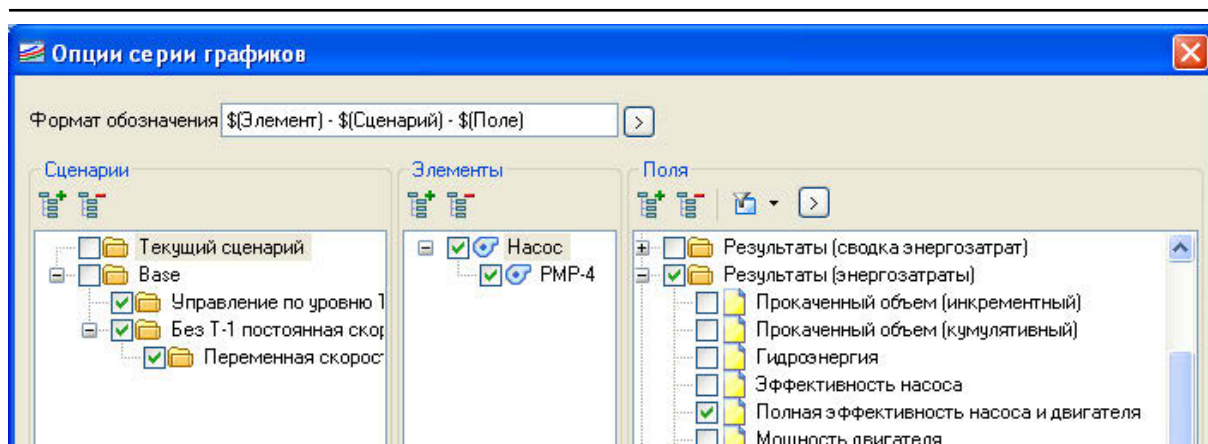
Общие энергозатраты на единицу: 0,0205 p./куб. м

Идентификатор	Обозначение	Время использования (часов)	Использование (%)	Прокаченный объем (общий) (куб. м)	Гидро (среднее) (к)
96	RMP-4	19,000	79,2	49 602,32	
97	RMP-5	0,000	0,0	0,00	

Рис. 8.40. Результаты расчета энергопотребления

Постройте графики энергоэффективности насоса и двигателя при трех рассмотренных сценариях для насоса RMP-4 (рис. 8.41).

Самостоятельно постройте графики энергоэффективности насоса и двигателя при трех рассмотренных сценариях для насоса RMP-5.



*Рис. 8.41. Полная эффективность (КПД) насоса PMP-4  
при различных вариантах управления*

---

## 8.6. Сравнение вариантов управления насосами

Некоторые результаты проведенных расчетов представлены в табл. 8.2. Как видно, наиболее эффективным является вариант энергоснабжения с регулирующим резервуаром Т-1. Предлагаем вам убедиться самостоятельно, что при заданных условиях управления насосами по уровню воды насос РМР-5 вообще не включается.

Таблица 8.2

### Результаты расчетов

	С резервуаром Т-1	Без Т-1, пост. скорость РМР-4	Без Т-1, перем. скорость РМР-4
Максимальный напор в узле J-1, м	57,8	70,4	55,0
Минимальный напор в узле J-1, м	40,8	57,4	59,4
Максимальный напор в узле J-3, м	48,6	67,3	53,4
Минимальный напор в узле J-3, м	44,4	59,7	46,0
Макс. эффективность РМР-4, %	71,1	71,1	71,2
Мин. эффективность РМР-4, %	70	53,1	18,2
Общее потребление энергии, кВт×ч	9850	13634	10806
Удельное потребление энергии, кВт×ч/м <sup>3</sup>	0,199	0,267	0,212

Несколько хуже вариант с частотным регулированием насоса РМР-4. Однако следует иметь в виду, что вследствие усложнения схемы энергоснабжения надежность такого регулирования ухудшается.

---

## 9. Проектирование сети с помощью Darwin Designer

### 9.1. Постановка задачи

Схема сети и исходные данные для проектирования подготовлены заранее в виде проекта *pr\_start.wtg* \*. Исходя из плана застройки, расположения промышленных предприятий и насосной станции второго подъема на плане района в масштабе построена схема сети, введены высотные отметки узлов (рис. 9.1). Для каждого узла определены виды потребителей, указаны соответствующие им графики неравномерности водопотребления, введены соответствующие базовые значения отборов.

В рамках данной работы необходимо определить диаметры трубопроводов и параметры насосной станции, которая пока изображена на плане условно в виде резервуара R-1.

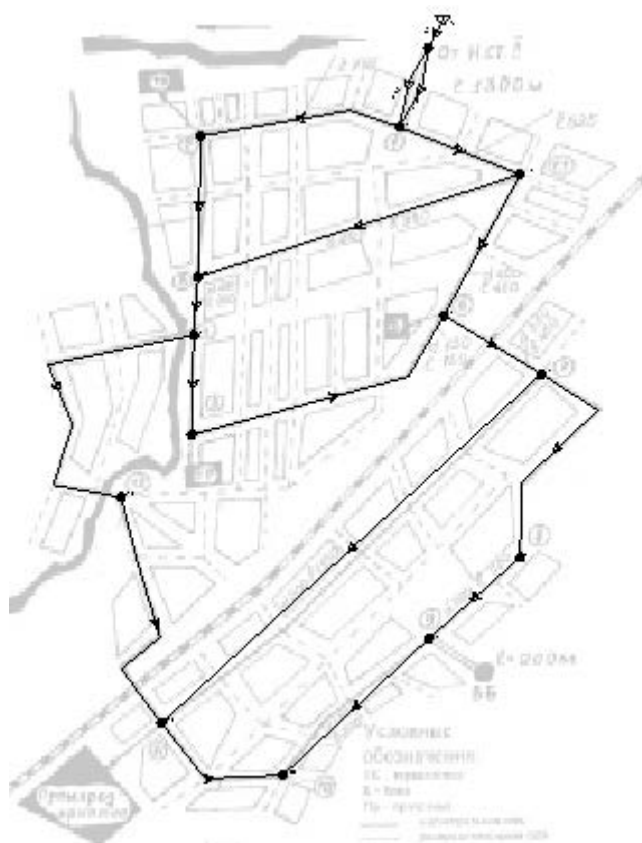


Рис. 9.1. Схема сети водоснабжения

---

\* Проект разработан с использованием методического руководства для выполнения курсового проекта по водоснабжению, разработанного на кафедре водного хозяйства и технологии воды УрФУ (авторы: Ю. В. Аникин, Л. И. Ушакова, А. Ф. Никифоров) в 2004 г.

---

Все трубопроводы чугунные (Ductile Iron). В качестве модели расчета их гидравлических сопротивлений выбрана формула Хазена – Вильямса с коэффициентом шероховатости  $C = 130$ . Диаметры труб пока приняты по умолчанию 152 мм (6 дюймов).

Перед началом работы сохраните исходный проект в своей папке.

## 9.2. Подбор диаметров трубопроводов

Перед началом вычислений создадим новый сценарий *24 часа* и новый расчет с тем же именем (рис. 9.2).

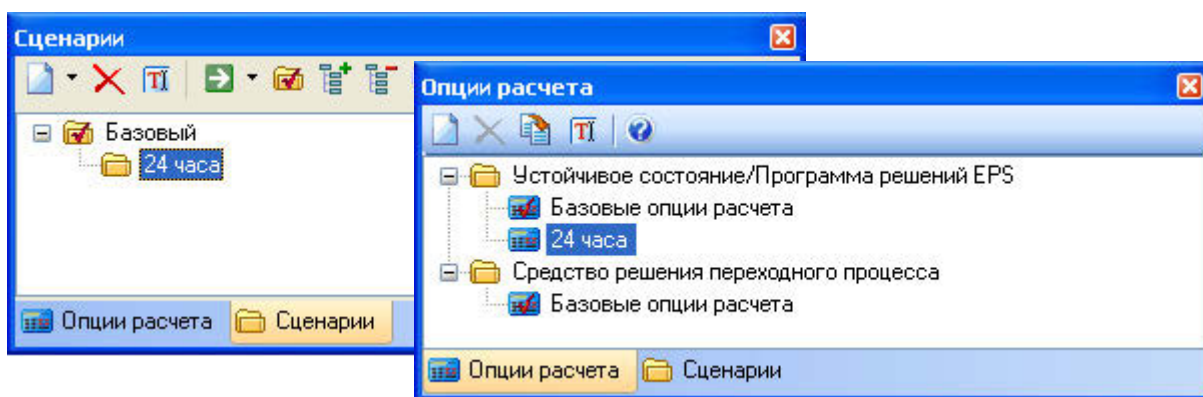


Рис. 9.2. Новый сценарий и расчет

Двойным щелчком откройте окно опций расчета и в пункте *Тип временного анализа* задайте *EPS* (рис. 9.3).

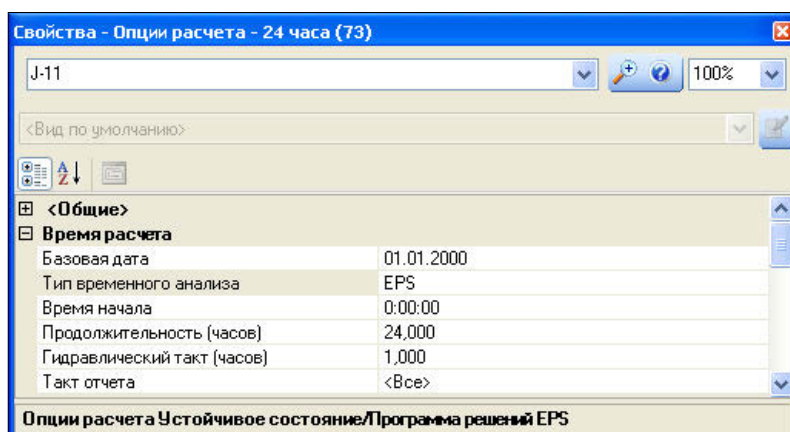


Рис. 9.3. Свойства расчета

Двойным щелчком откройте окно опций сценария *24 часа* и в пункте *Опции расчета* укажите расчет *24 часа* (рис. 9.4).

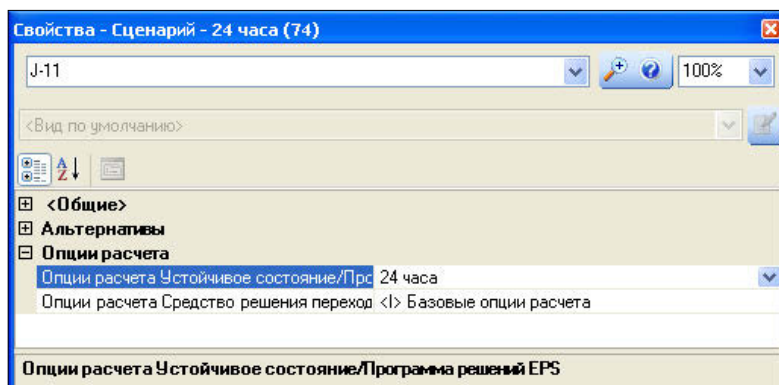


Рис. 9.4. Свойства сценария

Объявите сценарий *24 часа* текущим и выполните расчет. После его завершения вы получите предупреждение программы о том, что в узлах сети напор отрицательный, но пока это не имеет значения. Главное – убедиться, что все данные введены верно.

Постройте график изменения подачи в трубе, идущей от резервуара R-1. Он показывает изменение во времени общего водопотребления района (рис. 9.5). Максимальное потребление 1660 м³/час, а среднесуточное 1265 м³/час, т. е. максимальный коэффициент неравномерности 1,3.

С помощью таблицы *Труба* можно убедиться, что во многих трубопроводах скорость очень велика (рис. 9.6).

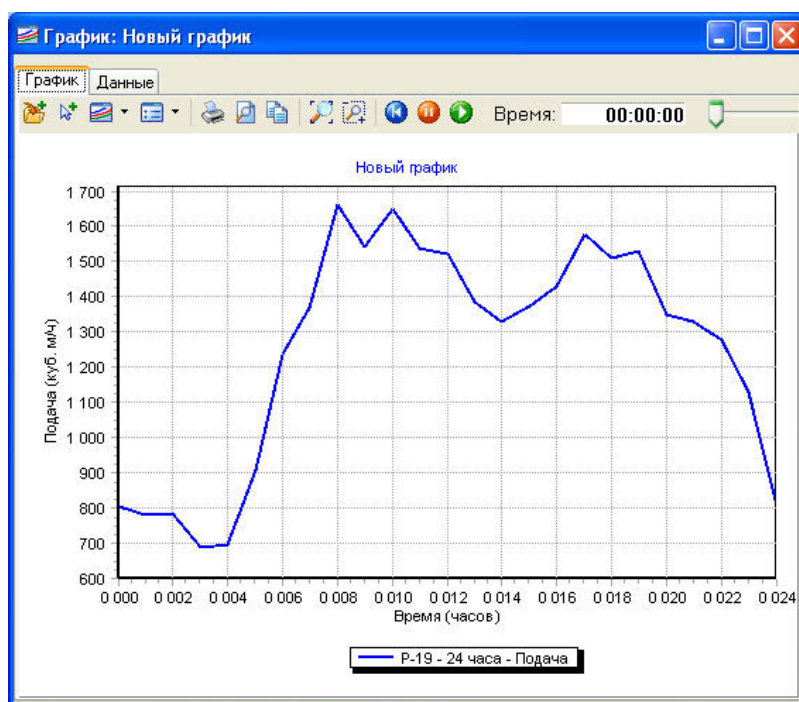


Рис. 9.5. График общего водопотребления сети





Труба FlexTable: Pipe Table (Текущее время: 0,000 часов) (PR\_...

	ID	Начальный узел	Конечный узел	Диаметр (дюйм)	Скорость (м/с)
62: P-19	62	R-1	J-14	6,0	19,26
49: P-13	49	J-1	J-13	6,0	10,58
57: P-17	57	J-14	J-1	6,0	9,63
58: P-18	58	J-14	J-1	6,0	9,63
30: P-3	30	J-3	J-4	6,0	7,57
26: P-1	26	J-1	J-2	6,0	7,44
50: P-14	50	J-13	J-6	6,0	6,63
28: P-2	28	J-2	J-3	6,0	6,10
36: P-6	36	J-6	J-7	6,0	5,68
47: P-12	47	J-4	J-12	6,0	3,63
51: P-15	51	J-13	J-3	6,0	2,71
32: P-4	32	J-4	J-5	6,0	2,70

Показано элементов: 19 из 19 СОРТИРОВАНО

Рис. 9.6. Таблица «Труба»

Вполне возможно, что некоторые значения будут отрицательными. Если вас это смущает, то установите курсор на соответствующую строку и нажмите кнопку  – *Масштабировать до* в меню окна. Трубопровод будет выделен на схеме. Откройте окно его свойств и в пункте *Изменение направления* кнопкой  поменяйте местами начальный и конечный узлы трубы (рис. 9.7).

Поскольку в данной сети труб относительно немного, подобрать их диаметры вручную можно довольно быстро. Нажмите кнопку

Свойства - Труба - P-12 (47)

P-12 100%

<Вид по умолчанию>

**<Геометрия>**

Геометрия <Набор: 5 элементы>

Длина (масштабированная) (м) 972,63

**<Общие>**

Идентификатор 47

Обозначение P-12

Комментарии

ГИС-ИДЕНТИФИКАТОРЫ <Набор: 0 элементы>

Гиперссылки <Набор: 0 элементов>

Начальный узел J-4

Конечный узел J-12

Изменение направления <Обратный пуск/останов>

Рис. 9.7. Изменение направления



– Редактировать и включите в список отображаемых параметров максимальную скорость (рис. 9.8).

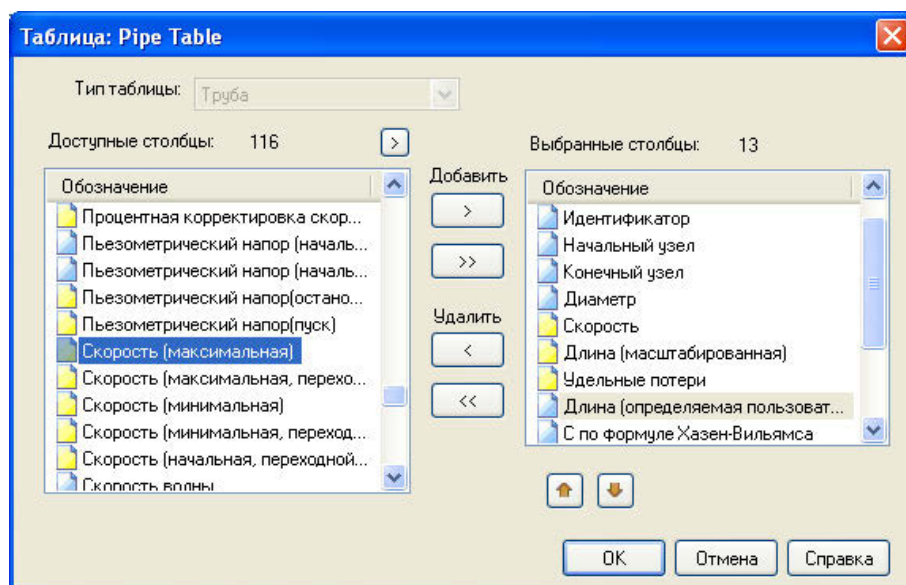


Рис. 9.8. Редактирование таблицы

Перед началом подбора диаметров сохраните проект под новым именем, чтобы позднее к нему можно было вернуться.

Для удобства отсортируйте список по убыванию скорости. Задача состоит в том, чтобы во всех трубах скорость движения воды быть порядка 1 м/с. Минимальное значение диаметра 152 мм (6 дюймов).

После изменения значений диаметров окно *FlexTable* можно не закрывать, а сразу запускать расчет. Обновление окна происходит автоматически (рис. 9.9).

После завершения подбора диаметров откройте таблицу *Узел* и отсортируйте результаты по возрастанию значений *Гидростатического напора*. Узел с наименьшим его значением является диктующей точкой. В нашем случае это узел J-9 (рис. 9.10).

Очевидно, что рассмотренную методику нельзя считать достаточно обоснованной, поскольку она не принимает во внимание допустимые значения напоров в узлах и, что очень существенно, экономические факторы.

Сохраните проект перед переходом к следующему этапу.

Труба FlexTable: Pipe Table (Текущее время: 0,000 часов) (PR_1a.wtg)					
	Начальный узел	Конечный узел	Диаметр (мм)	Скорость (м/с)	Скорость (максимальная) (м/с)
62: P-19	R-1	J-14	660,4	0,65	1,35
57: P-17	J-14	J-1	508,0	0,55	1,14
58: P-18	J-14	J-1	508,0	0,55	1,14
47: P-12	J-4	J-12	304,8	0,66	1,14
50: P-14	J-13	J-6	457,2	0,55	1,11
28: P-2	J-2	J-3	457,2	0,52	1,10
49: P-13	J-1	J-13	508,0	0,53	1,08
36: P-6	J-6	J-7	406,4	0,56	1,06
38: P-7	J-7	J-8	304,8	0,55	1,06
46: P-11	J-12	J-11	254,0	0,67	1,05
26: P-1	J-1	J-2	508,0	0,49	1,05
42: P-9	J-9	J-10	152,4	0,62	1,03

Рис. 9.9. Результат подбора диаметров труб

Узел FlexTable: Junction Table (Текущее ...)			
	Метка	Отметка (м)	Гидростатический напор (м)
39: J-9	J-9	208,00	-23,78
41: J-10	J-10	204,60	-22,09
37: J-8	J-8	206,00	-21,38
43: J-11	J-11	196,00	-13,37
33: J-6	J-6	194,00	-8,36
35: J-7	J-7	193,40	-8,02
24: J-1	J-1	194,00	-7,84
48: J-13	J-13	189,30	-3,35
25: J-2	J-2	189,00	-3,12
31: J-5	J-5	188,50	-3,02
27: J-3	J-3	188,10	-2,47
29: J-4	J-4	188,00	-2,45
45: J-12	J-12	184,30	-0,24
60: J-14	J-14	187,00	-0,05

Показано элементов: 14 из 1 СОРТИРОВАНО

Рис. 9.10. Напоры в узлах

---

### 9.3. Определение диаметров с помощью Darwin Designer


На данном этапе работы мы рассмотрим процедуру определения диаметров с учетом ограничений, накладываемых на величины узловых напоров, скоростей воды в трубах, а также найдем величину напора в питателе, который обеспечит требуемые параметры.


Откройте ранее сохраненный проект (до подбора диаметров). Объявите текущим сценарий *24 часа*. Введите диаметр 500 мм для труб Р-17 и Р-18, по которым вода подается в сеть, поскольку подбирать их нет необходимости.

Оценим величину напора в питателе (R-1). Согласно нормативам, принимая во внимание этажность застройки, необходимо обеспечить минимальный свободный напор 40 м во всех узлах.

Максимальная высотная отметка рассматриваемой сети 208 м (J-9). Это означает, что если пренебречь гидравлическими сопротивлениями, то уровень воды в резервуаре R-1 необходимо увеличить по меньшей мере до 248 м. Поскольку гидравлическое сопротивление сети мы еще не знаем, увеличим эту высоту хотя бы на 2 м, т. е. до 250 м.

WaterGEMS имеет инструмент Darwin Designer, предназначенный для определения диаметров трубопроводов, который минимизирует общую стоимость трубопроводов с учетом ограничений, накладываемых на величины напоров в узлах и скоростей воды в трубах. Само название этого инструмента говорит о том, что решение этой весьма непростой задачи осуществляется с использованием генетических алгоритмов.

Запустите инструмент Darwin Designer с помощью кнопки . С той же целью можно воспользоваться соответствующим пунктом меню **Анализ** (рис. 9.11). Экран содержит информацию о возможностях Darwin Designer и последовательности применения данного инструмента.

Первый шаг – создание *Нового изучения проекта*. С этой целью нажмите кнопку  – *Создать*. Можете сразу изменить предлагаемое программой наименование данного этапа работы.

Перейдите на вкладку *События проекта* и создайте *Новое событие проекта - 1*. В качестве образца сценария задайте *24 часа*.



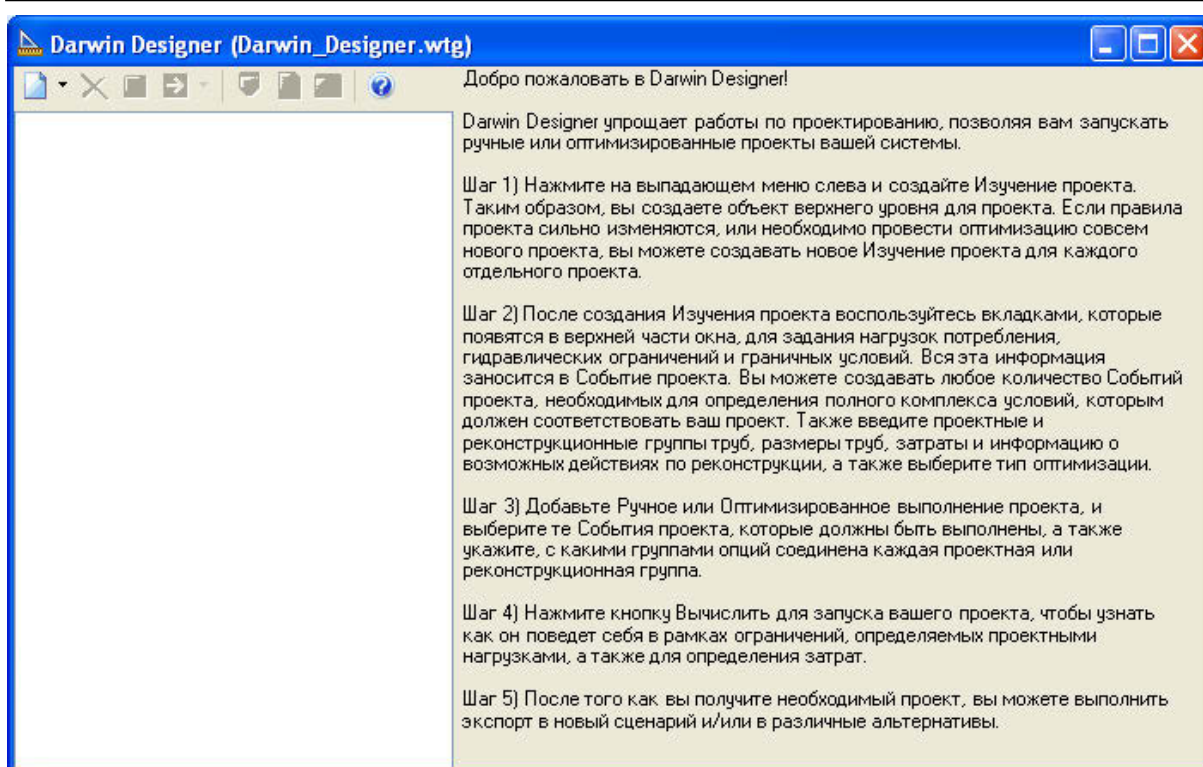


Рис. 9.11. Информационное окно Darwin Designer

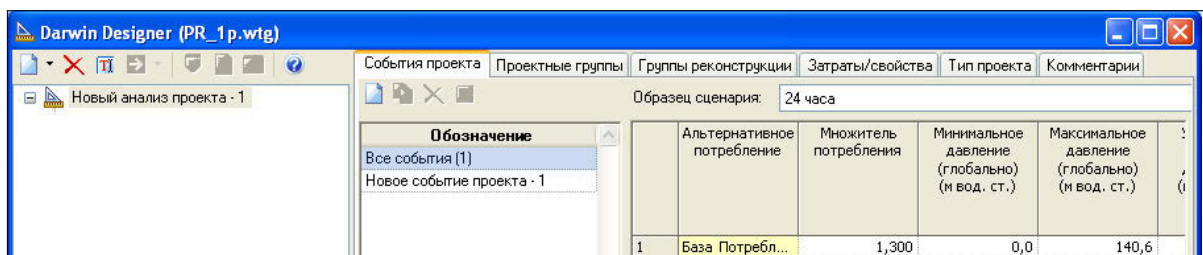


Рис. 9.12. Ввод множителя потребления

Задайте множитель потребления 1,3 (рис. 9.12), т. е. диаметры будут определяться по максимальным расходам.

Перейдите на вкладку *Затраты / Свойства*. Создайте новую группу опций проекта *Новая труба - 1* (рис. 9.13) и введите характеристики труб, из которых предполагается сооружать сеть. В нашем примере все трубы чугунные, имеющие коэффициент шероховатости  $C = 130$ . Конечно, затраты на прокладку одного метра

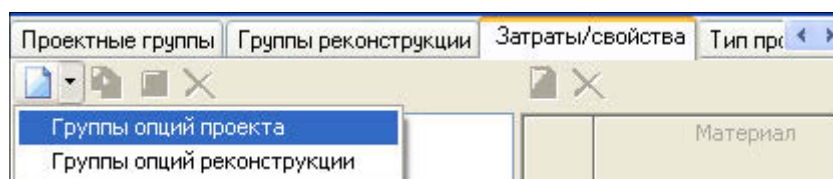


Рис. 9.13. Создание новой группы опций проекта

труб условные и отражают лишь их качественную зависимость от диаметров (табл. 9.1).


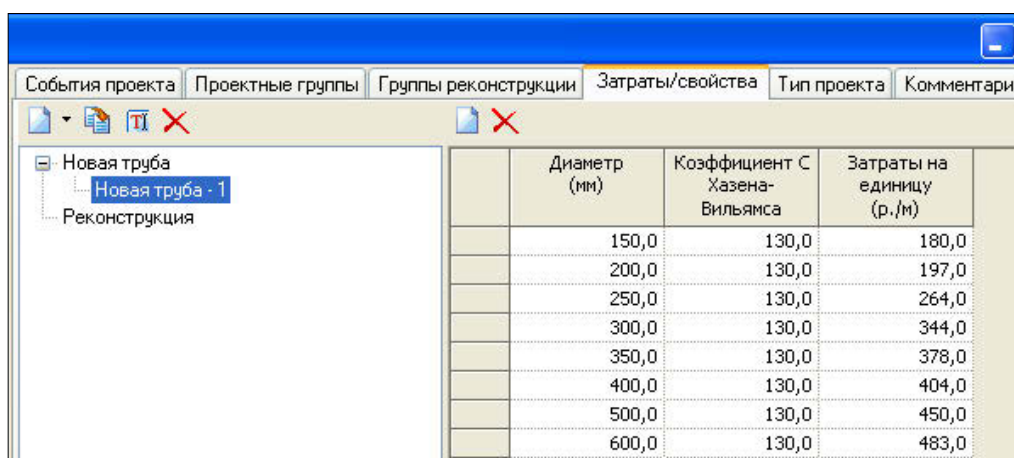
После создания группы опций проекта *Новая труба - 1* будет открыт доступ к еще одной кнопке  – *Создать*. Ее и следует нажать для ввода свойств труб, приведенных в таблице (рис. 9.14).

Таблица 9.1

Условные затраты на прокладку труб


Диаметр, мм	Затраты на единицу, руб/м
150	180
200	197
250	264
300	344
350	378
400	404
500	450
600	483



Диаметр (мм)	Коэффициент С Хазена-Вильямса	Затраты на единицу (р./м)
150,0	130,0	180,0
200,0	130,0	197,0
250,0	130,0	264,0
300,0	130,0	344,0
350,0	130,0	378,0
400,0	130,0	404,0
500,0	130,0	450,0
600,0	130,0	483,0

Рис. 9.14. Затраты на прокладку труб

Аналогичным образом можно создать группы для трубопроводов, изготовленных из других материалов или имеющих другой набор возможных диаметров.

Теперь перейдите на вкладку *Проектные группы* и нажмите кнопку . При этом запустится *Генератор проектных групп*, который автоматически найдет все трубопроводы сети.



После нажатия кнопки *ОК* вы вернетесь к вкладке проектных групп, где следует удалить трубы с метками P-17, P-18 и P-19, диаметры которых заданы и не должны меняться (рис. 9.15).

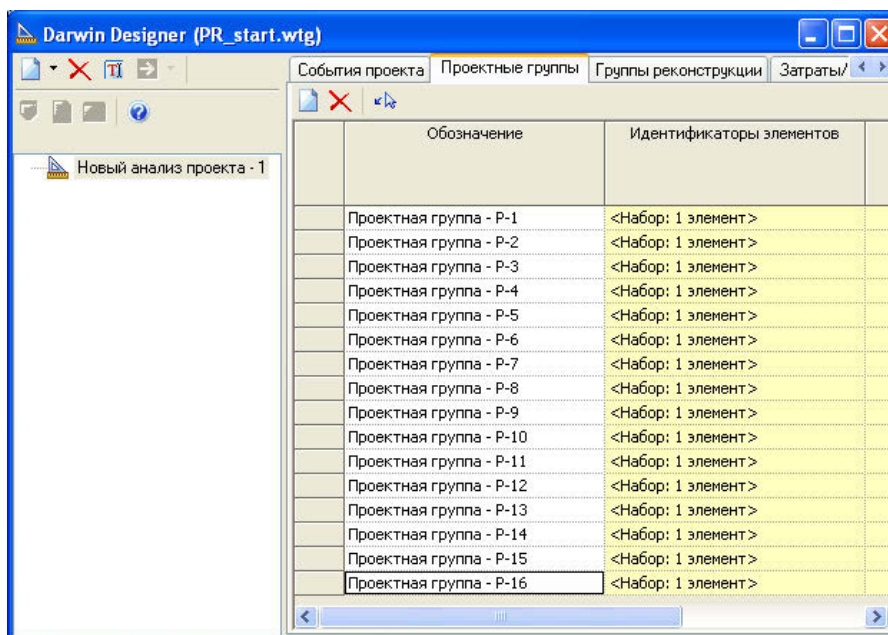


Рис. 9.15. Проектные группы

Следующий шаг – ввод ограничений. Перейдите на вкладку *События проекта* и в ее нижней части откройте вкладку *Ограничения давления* (рис. 9.16).

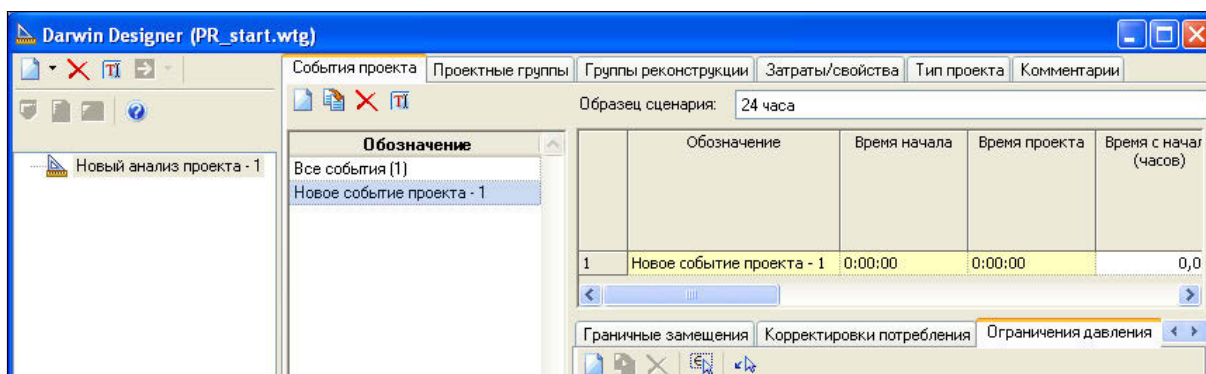



Рис. 9.16. Раздел ограничений

Здесь нужно указать предельно допустимые значения свободных напоров в узлах сети. Нажмите кнопку  для выбора узлов. В меню плавающей панели *Выбрать* активизируйте пункт *Сеть – Все узлы* (рис. 9.17).

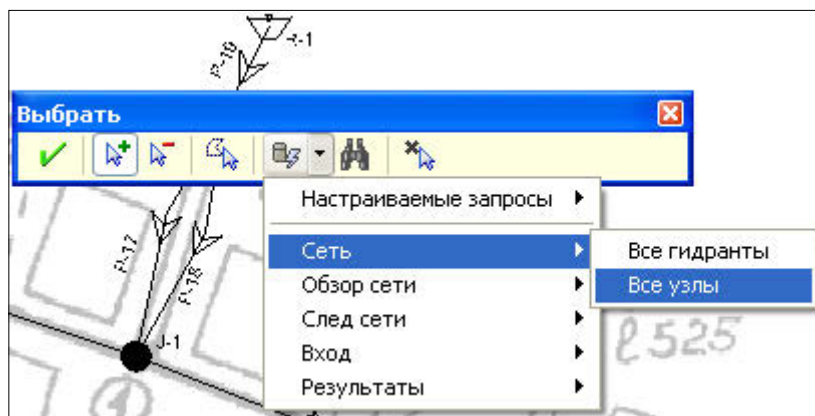




Рис. 9.17. Выбор узлов

Все узлы будут выделены на схеме. Далее нажмите кнопку  и исключите из данного набора узел J-14 на напорной линии, расположенный на входе в сеть. Завершите выбор кнопкой .

Корректировки потребления				
Ограничения давления				
Ограничения подачи				
	Узел	Заменить значения по умолчанию?	Минимальное давление (м вод. ст.)	Максимальное давление (м вод. ст.)
1	J-13	<input checked="" type="checkbox"/>	40,0	70,0
2	J-12	<input checked="" type="checkbox"/>	40,0	70,0
3	J-11	<input checked="" type="checkbox"/>	40,0	70,0
4	J-10	<input checked="" type="checkbox"/>	40,0	70,0
5	J-9	<input checked="" type="checkbox"/>	40,0	70,0

Рис. 9.18. Заданный диапазон напоров в узлах

Ограничения давления				
Ограничения подачи				
	Труба	Заменить значения по умолчанию?	Минимальная скорость (м/с)	Максимальная скорость (м/с)
9	P-16	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	1,00
10	P-10	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	1,00
11	P-11	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	1,00
12	P-12	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	1,00
13	P-13	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	1,00
14	P-14	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	1,00

Рис. 9.19. Заданный диапазон скоростей

С учетом этажности застройки во всех узлах необходимо обеспечить минимальный свободный напор 40 м. Максимальный напор 70 м. Введите эти значения в соответствующие колонки таблицы ограничений давления (рис. 9.18).

Перейдите на вкладку *Ограничения подачи*, где укажите, что максимальная скорость движения воды в трубах не должна превышать 1 м/с (рис. 9.19).

Перейдите на вкладку *Корректи-*

ровки потребления. Укажите, что в узлах J-9 и J-11 возможны дополнительные отборы воды на тушение пожаров в количестве 25 и 30 л/с соответственно (рис. 9.20).

	Узел	Дополнительное потребление (л/с)
1	J-11	30
2	J-9	25

Рис. 9.20. Корректировка потребления

На этом ввод ограничений завершается.

Перейдите на вкладку *Тип проекта*. Далее будет рассматриваться задача о поиске минимальной стоимости трубопроводов, поэтому задайте значение параметра *Объектный тип* – *Минимизировать* (рис. 9.21).

Рис. 9.21. Указание типа проекта

Теперь можно приступить к расчету. Создайте *Новый оптимизированный запуск проекта - 1* (рис. 9.22).

Рис. 9.22. Новый запуск

На вкладке *Проектные группы* укажите, что диаметры и стоимость прокладки труб должны выбираться из созданного ранее набора *Новая труба - 1* (рис. 9.23).

События проекта			
Проектные группы			
Группы реконструкции			
Опции			
Комментарии			
	Проектная группа труб	Активно?	Затраты/свойства
1	Проектная группа - P-1	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1
2	Проектная группа - P-2	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1
3	Проектная группа - P-3	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1
4	Проектная группа - P-4	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1
5	Проектная группа - P-5	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1
6	Проектная группа - P-6	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1
7	Проектная группа - P-7	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1
8	Проектная группа - P-8	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1
9	Проектная группа - P-9	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1
10	Проектная группа - P-10	<input checked="" type="checkbox"/>	Новая труба - 1

Рис. 9.23. Указание наборов труб для расчета

Запустите расчет. Вероятнее всего вы получите сообщение программы о невозможности найти приемлемое решение. В нашем случае это объясняется недостаточным напором в резервуаре R-1.

Выполните несколько расчетов при различных напорах в резервуаре. В данном примере физическую отметку воды в нем можно увеличивать с шагом 1 м. При этом окно Darwin Designer можно не закрывать. Обратите внимание, что с ростом напора стоимость прокладки сети уменьшается. Это происходит за счет увеличения доли использования труб с меньшими диаметрами.


В данном примере наилучшие решения получаются при уровне воды в питателе 252–254 м (рис. 9.24).

Solutions			
	С по формуле Хазен-Вильямса	Диаметр (мм)	Затраты (р.)
1	130,0	250,0	151 082,7
2	130,0	250,0	104 749,7
3	130,0	200,0	32 417,4
4	130,0	150,0	50 494,3
5	130,0	200,0	163 350,8
6	130,0	600,0	154 110,8
7	130,0	500,0	312 413,6
8	130,0	500,0	155 499,3
9	130,0	400,0	226 125,3
10	130,0	350,0	158 103,2
11	130,0	150,0	133 320,5
12	130,0	150,0	175 073,1
13	130,0	600,0	176 154,8
14	130,0	600,0	218 254,8
15	130,0	200,0	187 109,9

Рис. 9.24. Результаты расчета диаметров



Возможно, что ваше решение будет несколько отличаться от приведенного здесь.

Результаты решения могут быть представлены в графическом виде. Нажмите кнопку  окна Darwin Designer. Программа покажет суммарные длины труб каждого диаметра (рис. 9.25)

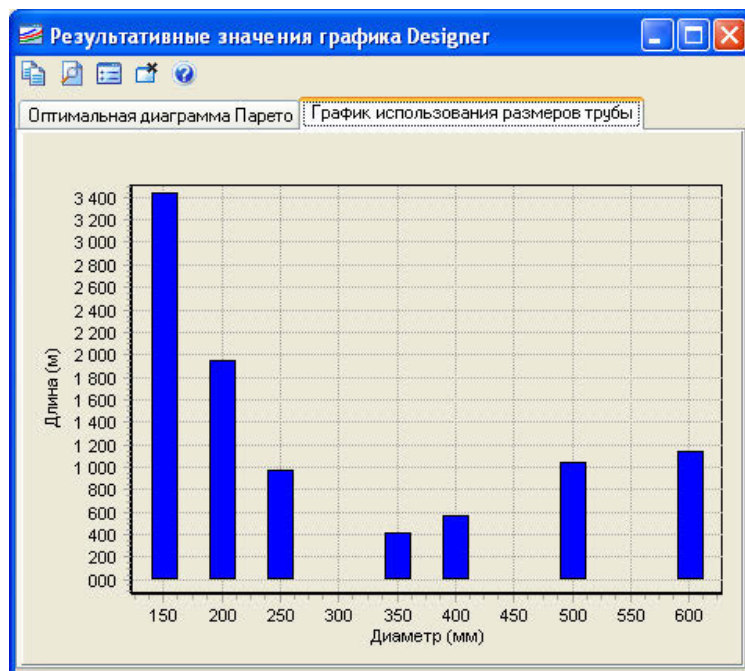



Рис. 9.25. График использования труб

Нажмите кнопку  для осуществления экспорта найденного решения в новый сценарий проекта (рис. 9.26).

**Экспортировать проект в сценарий**

**Экспорт в сценарий**

☒ Экспортировать сценарий?

Имя:

**Экспорт в альтернативы**

☒ Использовать имя сценария для альтернатив?

☒ Экспортировать физическую альтернативу?

Имя:

☒ Экспортировать альтернативную действующую топологию?

Имя:

OK Отмена Справка

Рис. 9.26. Экспорт решения в проект

После завершения экспорта закройте Darwin Designer и объявите текущим вновь созданный сценарий. Выполните расчет. Постройте графики изменения гидростатического напора в нескольких узлах сети для проверки выполнения заданных ограничений (рис. 9.27).

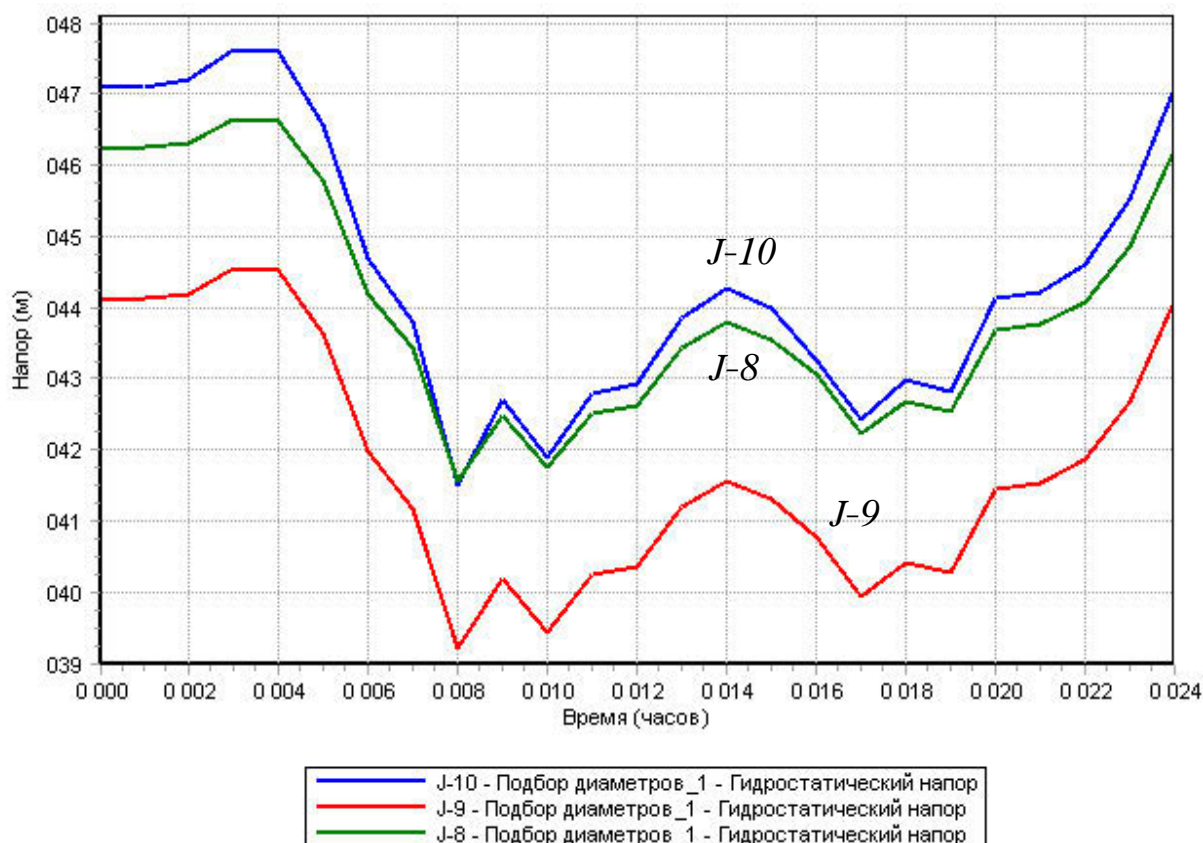


Рис. 9.27. Изменение свободного напора в некоторых узлах

## 9.4. Многокритериальный анализ

При решении предыдущей задачи принимались во внимание только физические ограничения (по напорам и скоростям), но Darwin Designer позволяет решать оптимизационные задачи и в случаях ограниченного бюджета.

Восстановите окно *Darwin Designer*. Новый анализ выполним на основе предыдущего (рис. 9.28).

Перейдите на вкладку *Тип проекта* и задайте:

Объектный тип..... Многокритериальный  
Доступный бюджет... 3 500 000  
Тип эффекта..... Безразмерный



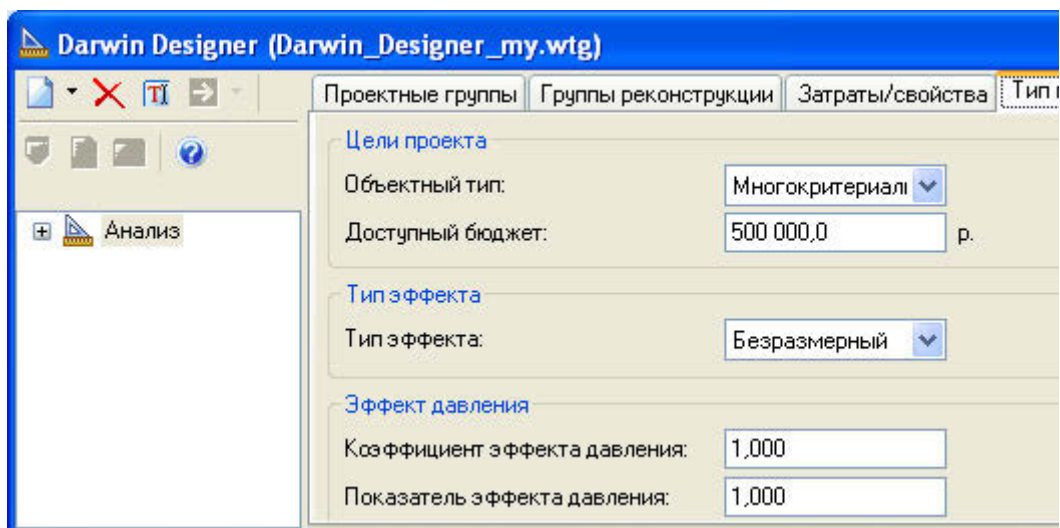


Рис. 9.28. Параметры оптимизации

В ходе предыдущего анализа мы нашли решение, при котором достигается минимум затрат на прокладку трубопроводов с одновременным выполнением заданных ограничений. Затраты составили чуть более 2,6 млн руб. В данном примере доступный бюджет существенно выше этого значения. Позволяет ли он найти лучшее решение?

При постановке такого вопроса сначала необходимо конкретизировать само понятие «лучшее решение». Очевидно, оно должно учитывать не только экономические, но и какие-то иные критерии.

В программе Darwin Designer в качестве такого критерия используется так называемый эффект давления.

Эффект давления – это особым образом построенная функция, характеризующая относительное увеличение давления в указанных пользователем узлах сети. Предполагается, что с точки зрения эксплуатации сети наилучшим из множества вариантов ее реконструкции должен быть тот, при котором достигаются более высокие давления в узлах.

Увеличение давления в узлах возможно только за счет снижения потерь напора, т. е. нужно использовать трубы больших диаметров. Со своей стороны это приводит к росту стоимости сети. Таким образом, имеется противоречие, и уже сам пользователь должен принять некое компромиссное решение на основе информации, предоставляемой программой.

Обратите внимание, что на вкладке *Тип проекта* теперь доступны для изменения два коэффициента, характеризующие эффект давления. В данной работе мы не будем рассматривать методику его расчета и оставим эти коэффициенты без изменения.

Перейдите к вкладке *События проекта* и путем дублирования предыдущего события создайте событие *С бюджетом* (рис. 9.29).

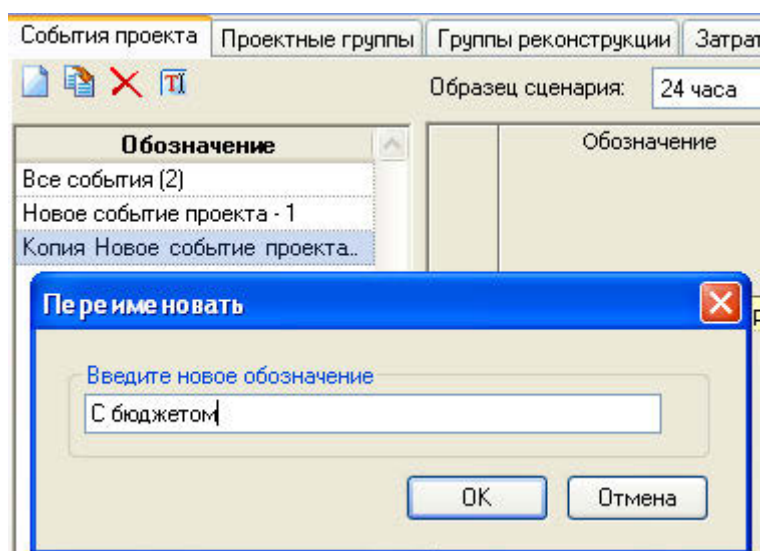


Рис. 9.29. Новое событие проекта

Убедитесь, что множитель потребления равен 1,3 и задана необходимая корректировка потребления в узлах J-9 и J-11.

Перейдите на вкладку *Ограничения давления*. Найдите в списке диктующий узел J-9. Поставьте отметку в пункте *Учитывать эффект давления в данном узле*.

Создайте *Новый автоматизированный запуск - 2* и снимите отметку об активности с предыдущего события, поскольку проводить его повторный расчет нет необходимости (рис. 9.30).

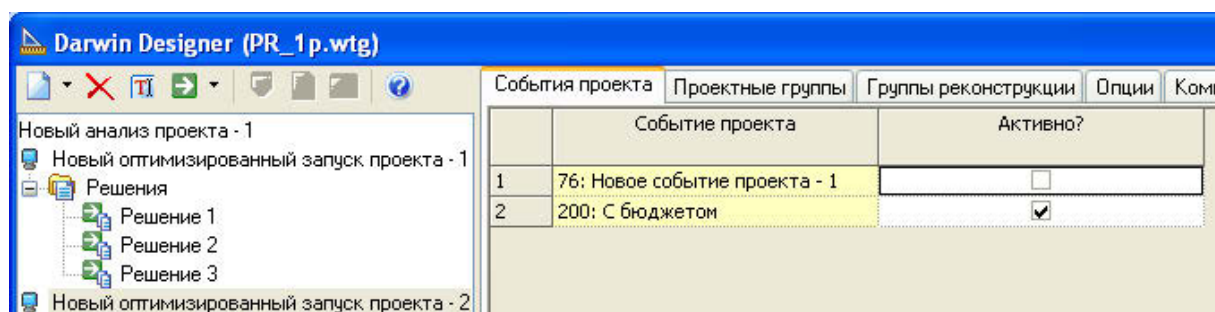


Рис. 9.30. Активные события

На вкладке *Проектные группы* задайте те же наборы проектных параметров, что и при предыдущем анализе (см. рис. 9.23). На вкладке *Опции* увеличьте число оставляемых решений до 20.


Запустите расчет. После его завершения выделите щелчком *Решение 1* и нажмите кнопку  для построения графика (рис. 9.31).

График называется диаграммой Парето по имени предложившего его итальянского экономиста. По оси абсцисс отложен эффект давления, о котором шла речь выше. Сам график представляет собой кривую, огибающую поле всех решений задачи. Наихудшие решения на нем не показаны.

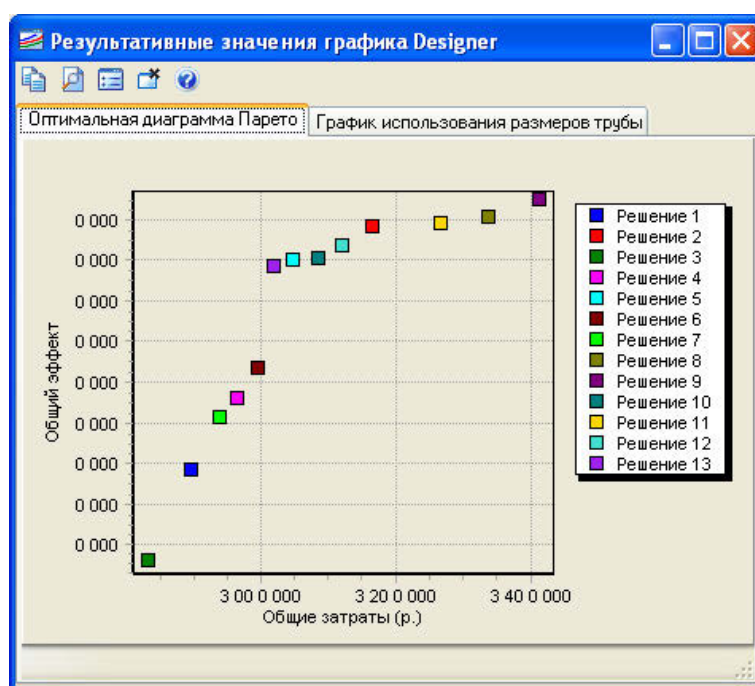


Рис. 9.31. Диаграмма Парето

Предлагаем убедиться, что даже самое дешевое решение № 3 не совпадает с найденным при предыдущем анализе. Напор в контрольном узле J-9 составляет 40,5 м, т. е. несколько меньше, чем в предыдущем случае.

Самое дорогое решение – № 9. При нем напор в контрольном узле J-9 составляет 42,2 м.

Предлагаем вам убедиться самостоятельно, что при бюджете менее минимального (2,6 млн руб.) обеспечить выполнение всех ограничений не удастся.

---

## 10. Моделирование изменения качества воды

### 10.1. Основные принципы моделирования качества воды

Предприятия «Водоканал» обязаны снабжать потребителей водой надлежащего качества. Ее химический состав, цветность, мутность и многие другие параметры регламентируются соответствующими государственными стандартами.

Однако на пути движения воды от источников (фильтровальных станций, очистных сооружений) к потребителям качество воды ухудшается. Это обусловлено разнообразными физико-химическими и биологическими процессами, протекающими как внутри объема самой воды, так и на поверхностях труб, резервуаров, арматуры.

Средства воздействия на эти процессы довольно ограничены:

- герметизация резервуаров и регулирующих емкостей;
- замена металлических труб на пластиковые;
- тщательная промывка и дезинфекция оборудования и труб после ремонта или замены и т. п.

Моделирование изменения качества воды при ее движении в трубопроводах сети основано на трех принципах.

Первый из них – закон сохранения массы (расхода) – является одним из фундаментальных законов природы и не нуждается в пояснении.

Вторым принципом является допущение, что при слиянии потоков в узлах сети происходит их полное и мгновенное смешение.

Рассмотрим узел сети (рис. 10.1), в котором соединяются четыре трубопровода. По двум из них вода втекает в узел, а по двум другим вытекает. Расходы воды, втекающей в узел, и концентрация какой-либо примеси в ней (например, хлора) равны соответственно  $Q_1, Q_2$  и  $C_1, C_2$ .

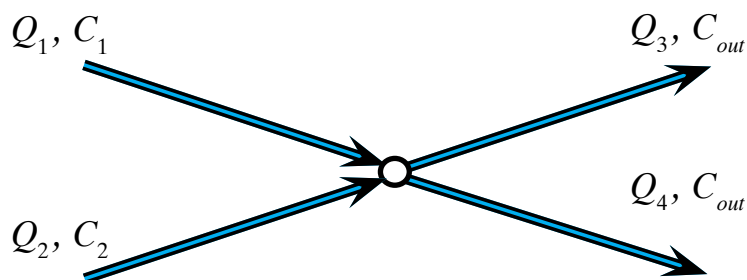


Рис. 10.1. Смешение потоков в узле

---

Согласно закону сохранения расхода:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 .$$

Принимая во внимание второе допущение, считаем, что концентрация вещества в истекающих потоках воды одинаковая,  $C_{out}$ . Ее можно найти по формуле:

$$C_{out} = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_1 + Q_2} .$$

Величина, стоящая в числителе, – количество примеси, поступающей к узлу, а в знаменателе – суммарный расход втекающей воды.

Третьим принципом моделирования является допущение, что изменение концентрации примеси при движении воды в трубе может быть описано дифференциальным уравнением:

$$\frac{dC}{dt} = -V \frac{\partial C}{\partial x} + kC .$$

Данное уравнение описывает изменение количества примеси во времени внутри элементарного объема трубы длиной  $dx$  при скорости воды в трубе  $V$  и константе скорости происходящей внутри него химической реакции  $k$  (рис. 10.2).

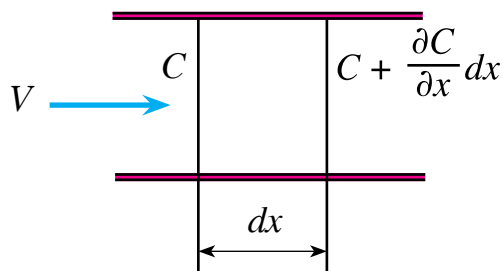


Рис. 10.2. Изменение концентрации вещества в малом объеме

Из дифференциального уравнения изменения концентрации следует важный вывод: поскольку изменение концентрации примеси зависит от скорости воды, то гидравлический расчет сети должен предшествовать моделированию изменения ее качества.

В частном случае, когда вода неподвижна:

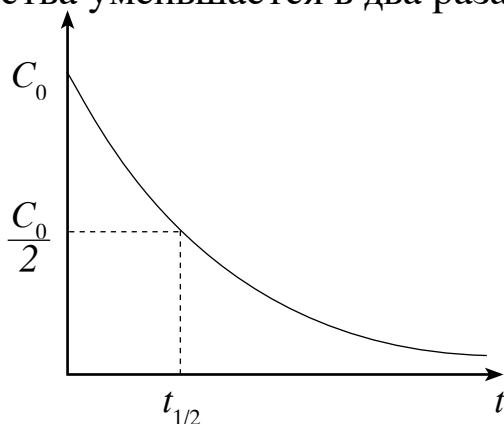
$$\frac{dC}{dt} = kC .$$

---

Это уравнение может быть проинтегрировано аналитически. В частности, для случая разложения некоторой примеси, имеющей в момент  $t = 0$  концентрацию  $C = C_0$ , получаем:

$$C = C_0 e^{-kt}.$$

График этой зависимости схематично показан на рис. 10.3. В качестве характеристики темпа уменьшения концентрации используют время полураспада,  $t_{1/2}$ . Это то время, в течение которого концентрация вещества уменьшается в два раза.



*Рис. 10.3. Уменьшение концентрации вещества в неподвижном объеме и время полураспада*

В случае роста концентрации какой-либо примеси она стремится к некоторому равновесному значению  $C_{\max}$ . Этот процесс описывают уравнением

$$\frac{dC}{dt} = k(C_{\max} - C),$$

которое после интегрирования принимает вид:

$$C = C_{\max} - (C_{\max} - C_0)e^{-kt}.$$

Эти уравнения применяют также и для расчета изменения концентрации веществ на твердых поверхностях при движении жидкости в трубах, поскольку скорость на твердой поверхности всегда нулевая (говорят, что жидкость «прилипает» к поверхности).

При этом нужно учитывать не только скорость самой химической реакции, но и процесс массообмена у поверхности, т. е. интен-



---

сивность поступления реагентов из объема жидкости. Показатель степени  $k$  записывают в виде:

$$k = k_o + \frac{k_c \cdot k_f}{R(k_c + k_f)} \cdot$$

В данном выражении  $k_o$  и  $k_c$  – коэффициенты скорости химических реакций, происходящих в объеме жидкости и на твердой поверхности соответственно,  $k_f$  – коэффициент массопереноса, зависящий от числа Рейнольдса и коэффициента диффузии примеси,  $R$  – гидравлический радиус трубы.

На величину коэффициента  $k_c$  оказывает влияние и шероховатость поверхности. Чем выше шероховатость, тем больше площадь поверхности, на которой протекает химическая реакция. Кроме того, высокая шероховатость способствует развитию и биологических процессов. Можно с уверенностью сказать лишь то, что величина  $k_c$  увеличивается с ростом шероховатости и изменяется в очень широких пределах.

Очевидно, что далеко не все эти коэффициенты могут быть заданы заранее с необходимой точностью. По этой причине адекватная модель изменения концентрации примесей может быть построена только с использованием данных непосредственных измерений на действующей сети с последующим уточнением модели. Эту процедуру называют калибровкой модели качества воды.

Степень развития химических и биологических процессов зависит от времени пребывания воды внутри сети. В зарубежной практике моделирования это время называют возрастом воды (water age). Возраст воды служит хоть и относительным, но достаточно объективным показателем качества воды, получаемой потребителями.

Возраст воды – это время, в течение которого вода, подаваемая в сеть, достигает потребителей. Возраст воды, отбираемой из того или иного узла, различен и меняется с течением времени. Например, он выше в тех узлах, к которым вода поступает по длинным трубопроводам, и уменьшается с ростом скорости движения.

Для вычисления возраста воды достаточно выполнить гидравлический расчет сети, т. е. калибровка модели качества не требуется. Определение возраста основано на двух принципах.

---

Во-первых, очевидно, что время нахождения некоторого объема воды в трубе известной длины определяется путем ее деления на скорость движения воды.

Во-вторых, предполагается, что при смешении разновозрастных потоков в каком-либо узле происходит их полное смешение. Если рассматривать возраст воды как своеобразную «примесь», то возраст истекающих потоков будет одинаковым, и рассчитывать его можно по аналогии с определением концентрации примеси при смешении потоков.

Рассмотрим пример, показанный на рис. 10.4. Если расходы воды, втекающей в узел, равны  $Q_1$  и  $Q_2$ , а возраст этих потоков соответственно  $T_1$  и  $T_2$ , то возраст истекающих потоков  $T_{out}$ , в том числе и отбора  $q$ , рассчитывается по формуле:

$$T_{out} = \frac{Q_1 T_1 + Q_2 T_2}{Q_1 + Q_2}.$$

Существенное влияние на возраст воды оказывают накопительные и регулирующие резервуары, внутри которых вода может находиться в течение продолжительного времени (до нескольких суток).

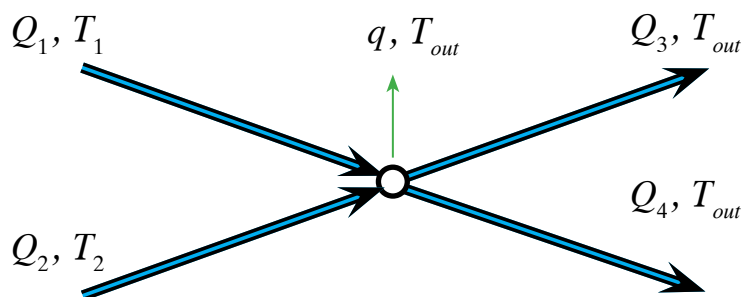


Рис. 10.4. Смешение разновозрастных потоков в узле

## 10.2. Моделирование качества воды в среде WaterGEMS

### 10.2.1. Постановка задачи

В нашем распоряжении имеется заранее подготовленный файл проекта *Water\_Quality.wtg* (предоставлен фирмой Bentley), который рекомендуется сразу сохранить в своей рабочей папке (рис. 10.5).

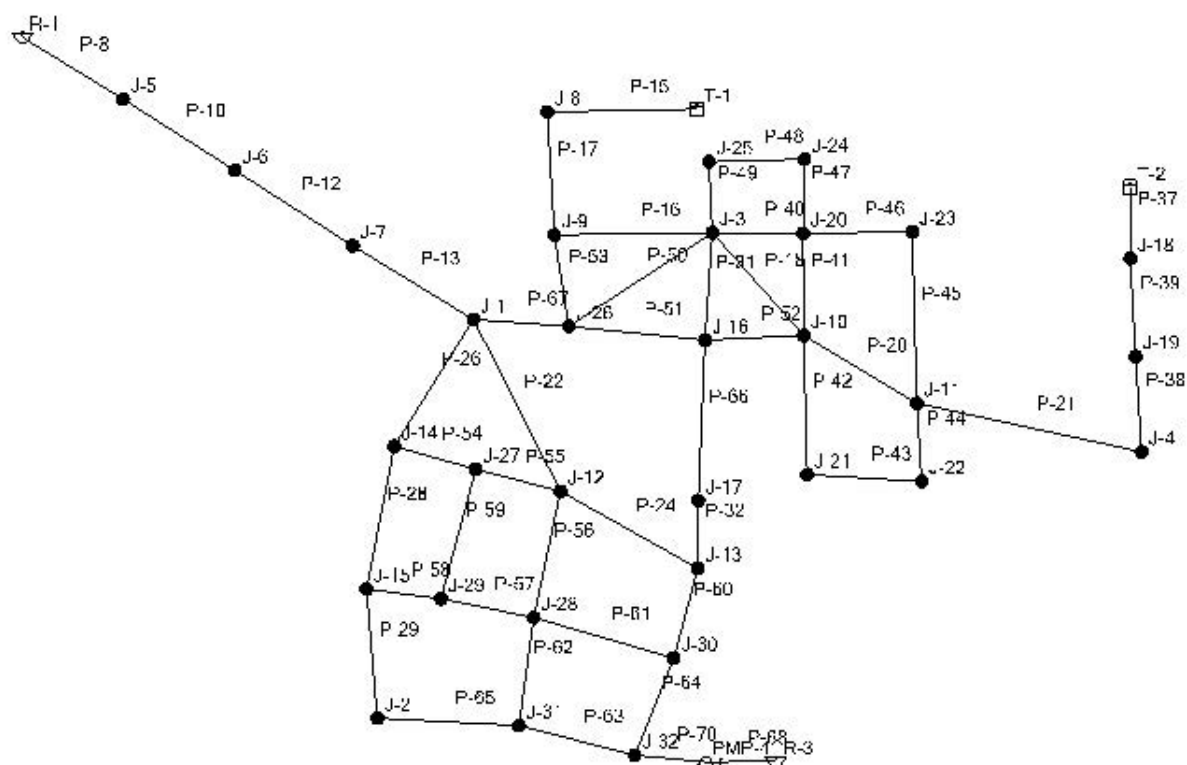


Рис. 10.5. Расчетная схема сети

В первой части работы исследуется процесс смешения воды, поступающей в сеть из двух источников. В одном из них, R-1, концентрация растворенных солей (КРС) составляет 250 мг/л, в другом источнике R-3 КРС составляет 600 мг/л.

Вода из источника R-1 поступает в сеть постоянно. Из источника R-3 вода подается в сеть насосом PMP-4. Насос автоматически включается, если уровень воды в башне T-1 снижается до 49,7 м. Насос отключается, если уровень воды в башне повышается до 51,2 м.

Во второй части работы будут выполнены расчеты изменения остаточной концентрации хлора. Будут рассмотрены два вида химических реакций, происходящих в объеме воды и на поверхности трубопроводов.

---

В третьей части работы будет рассмотрен процесс изменения возраста воды в системе, т. е. времени ее пребывания в трубопроводах и водонапорных башнях. Кроме того, можно будет проследить за движением воды, поступающей в сеть из источника R-1.

### 10.2.2. Моделирование процесса смешения потоков воды

Альтернатива WaterGEMS, которая используется при моделировании процессов изменения качества воды, называется *Составляющая – Default-Constituent*. С целью выполнения данной части работы вам необходимо создать новую дочернюю альтернативу.

Откройте окно менеджера альтернатив, установите курсор на альтернативу *Составляющая – Default-Constituent*. Далее нажмите правую кнопку мыши для вызова контекстного меню. В нем выберите пункт *Создать – Альтернатива для потомка*. Рекомендуем сразу переименовать новую альтернативу (рис. 10.6), назвав ее, например, *КРС* (концентрация растворенных солей).

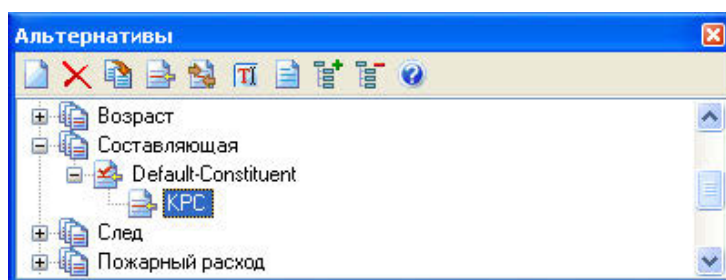


Рис. 10.6. Дочерняя альтернатива для расчета КРС

Теперь необходимо задать конкретные параметры для данной альтернативы. Двойным щелчком откройте окно *Составляющая* (рис. 10.7).

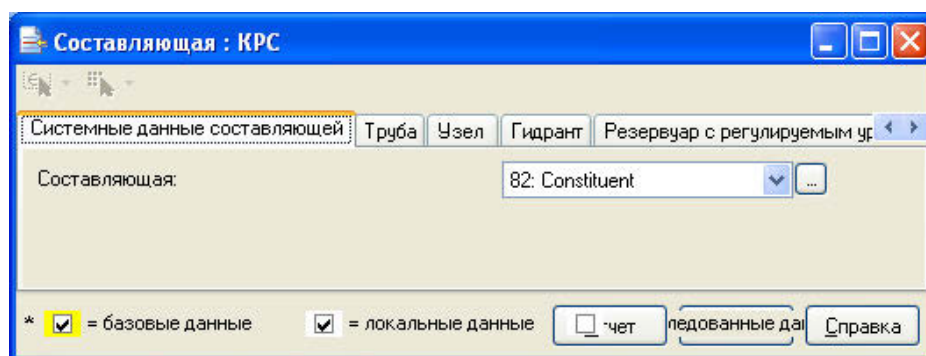




Рис. 10.7. Параметры альтернативы

На вкладке *Системные данные составляющей* нажмите кнопку  в поле *Составляющая*. Это приведет к открытию окна *Составляющие*. В нем необходимо указать конкретные параметры, характеризующие те или иные химические реакции, кинетику которых вы планируете исследовать.

Нажмите кнопку  – *Создать* в левой части данного окна и введите обозначение процесса, который будет рассмотрен в первую очередь. В нашем случае оно может иметь имя альтернативы *KPC* (рис. 10.8).

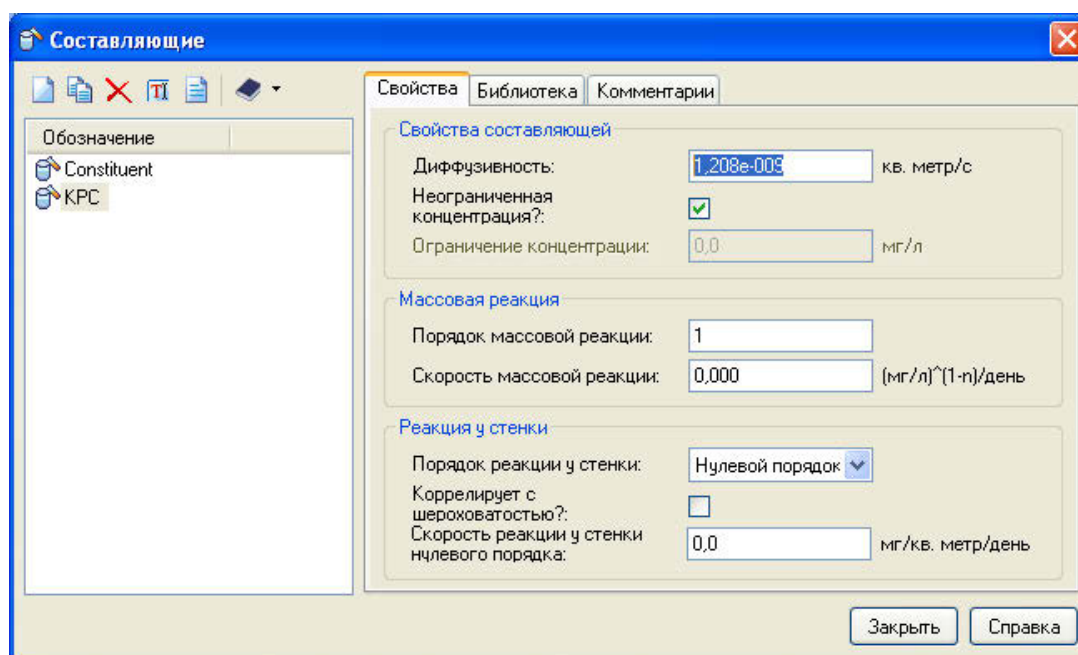


Рис. 10.8. Системные данные альтернативы

Поскольку сейчас будет рассматриваться лишь процесс смешения потоков с различной концентрацией растворенных солей, нужно задать только коэффициент диффузии – *Диффузивность*  $1,208e-009 \text{ м}^2/\text{с}$ . Этот коэффициент характеризует процесс диффузионного массопереноса примесей в объеме воды. Коэффициенты, характеризующие скорости химических реакций, нулевые. После ввода необходимых параметров нажмите кнопку *Закрыть* и укажите наименование процесса в поле *Составляющая* окна *Составляющая*: *KPC* (рис. 10.9).

Следующий шаг – ввод значений концентраций солей в резервуарах. Перейдите к соответствующей вкладке окна *Составляющая*:

КРС и введите указанные ранее значения параметра *Концентрация (начальная)* для резервуаров R-1, R-3 (рис. 10.10).

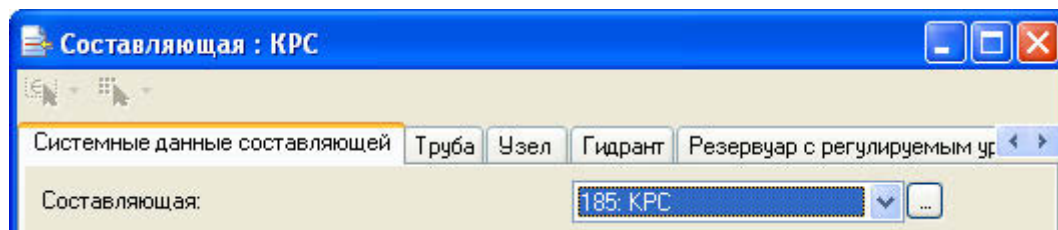


Рис. 10.9. Параметры альтернативы

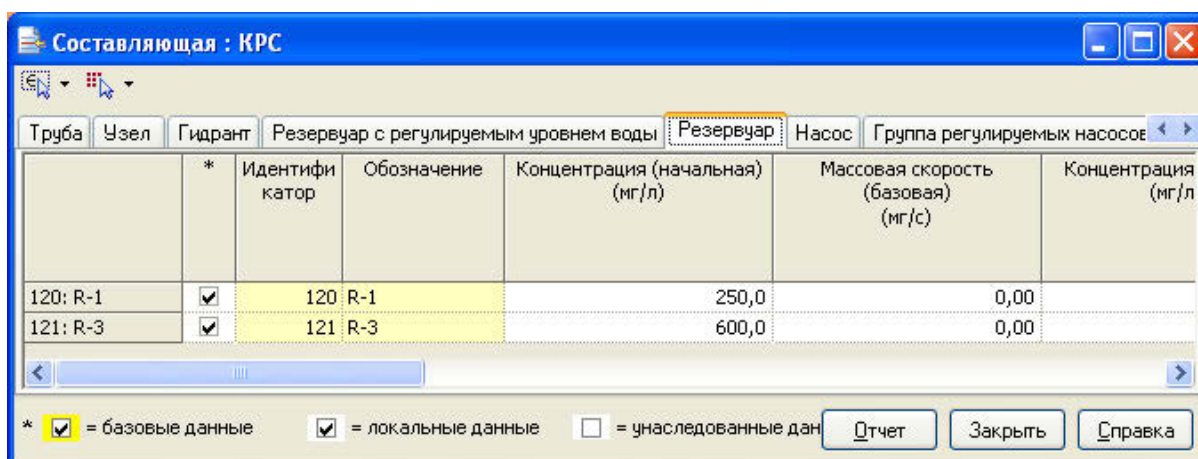


Рис. 10.10. Ввод концентраций примесей в резервуарах

Далее необходимо задать параметры расчета. С этой целью нажмите кнопку – *Опции расчета* или воспользуйтесь одноименным пунктом главного меню **Анализ**.

В окне *Опции расчета* установите курсор на пункт *Устойчивое состояние / Программа решений EPS* и создайте новый вариант расчетов *Изменение концентрации за 144 часа* (рис. 10.11).

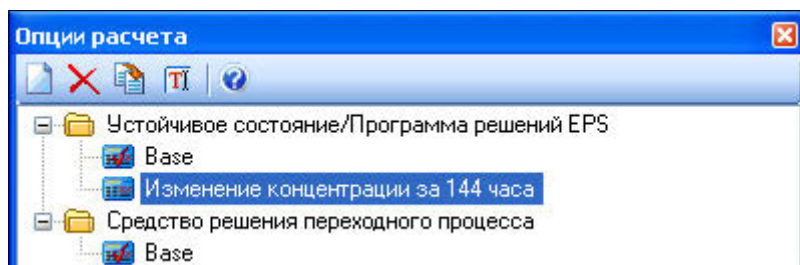


Рис. 10.11. Новый вариант расчетов

Двойным щелчком по этому пункту откройте окно свойств. Необходимо указать (рис. 10.12):



Тип расчета..... *Составляющая*  
 Базовая дата..... *Текущая дата*  
 Время начала..... *00:00:00*  
 Продолжительность.... *144*  
 Гидравлический такт... *1*

**Свойства - Опции расчета - Создать Устойчивое сос...**

Вид по умолчанию

**<Общие>**

Идентификатор	186
Обозначение	Изменение концентрации за 144
Комментарии	
Метод сопротивления	Формула Хазен-Вильямса
Набор выбора вывода	<Все>
Тип расчета	Составляющая

**Время расчета**

Базовая дата	13.10.2010
Время начала	0:00:00
Продолжительность (часов)	144.000
Гидравлический такт (часов)	1.000
Такт отчета	<Все>
Задать такт качества воды	Неверно

*Рис. 10.12. Параметры расчета*

Создайте новый дочерний сценарий и укажите его альтернативы (рис. 10.13).

**Сценарии**

Base

KPC

Сценарии


Опции расч

Обозначение	KPC
Комментарии	
<b>Альтернативы</b>	
Действующая топология	<I> 23: Base-Active Topology
Физический	<I> 24: Base-Physical
Потребление	<I> 26: Peak Hour
Начальное положение	<I> 27: Base-Initial Settings
Рабочий	<I> 28: Base-Operational Controls
Возраст	<I> 29: Default-Age
Составляющая	184: KPC
След	<I> 31: Default-Trace
Пожарный расход	<I> 32: Base-Fire Flow
Промывка	<I> 183: Base Flushing
Энергозатраты	<I> 33: Base-Energy Cost
Переходной	<I> 182: Base HAMMER
Потребление, зависящее от давл	<I> 34: Base Pressure Dependent Demand
Расширения данных пользователя	<I> 35: Base-User Data
<b>Опции расчета</b>	
Опции расчета Устойчивое состоя	186: Изменение концентрации за 144

*Рис. 10.13. Свойства сценария KPC*

Объявите данный сценарий текущим и выполните расчет. Просмотр его результатов наиболее удобно осуществить с использованием цветового кодирования.

На панели *Символика элементов* щелкните правой кнопкой по пункту *Труба*. В контекстном меню выберите пункт *Создать – Цветовое кодирование* (рис. 10.14).

В поле *Имя поля* окна *Свойства цветовой кодировки* укажите *Концентрация (расчетная)*. После нажатия кнопки *Рассчитать диапазон (полный диапазон)* вы увидите минимальное и максимальное значение концентрации. В поле *Опции* задайте значение *Цвет*. После нажатия кнопки  – *Инициализировать* вы увидите предлагаемые программой цвета для отображения различных концентраций на схеме сети. При желании их можно изменить.

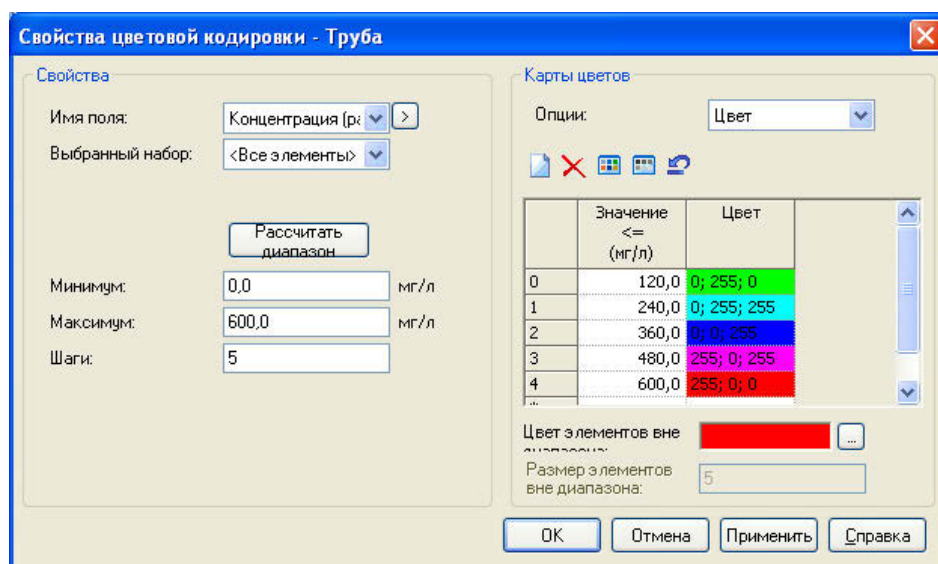



Рис. 10.14. Параметры цветового кодирования

Для просмотра результатов расчета в режиме анимации нажмите кнопку  – *Программа просмотра результатов EPS*.

Результаты расчета могут быть представлены в виде графиков. Например, для построения графика изменения концентрации в узле J-13 найдите его на схеме и щелчком правой клавиши мыши откройте контекстное меню. В нем укажите пункт *График*. В окне *Опции серии графиков* укажите вид графика *Результаты (качество воды) – Концентрация расчетная* (рис. 10.15).

На вкладке *Данные* те же результаты представлены в виде таблицы. При желании вы можете установить фильтр на отображаемые

данные. Например, для отображения результатов расчета за первые сутки установите курсор на заголовок колонки *Время* и нажмите правую кнопку мыши для отображения контекстного меню. В нем укажите пункт *Фильтр – Настройка* (рис. 10.16).

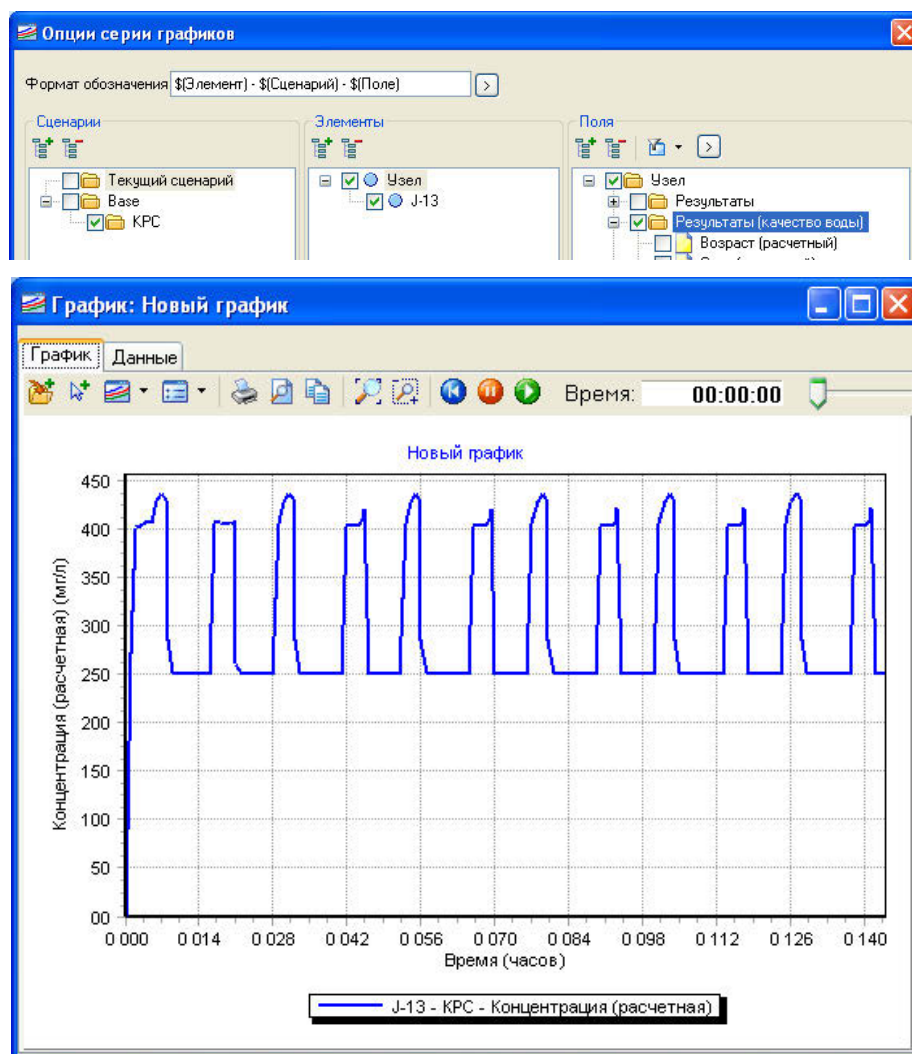


Рис. 10.15. График изменения концентрации в узле J-13

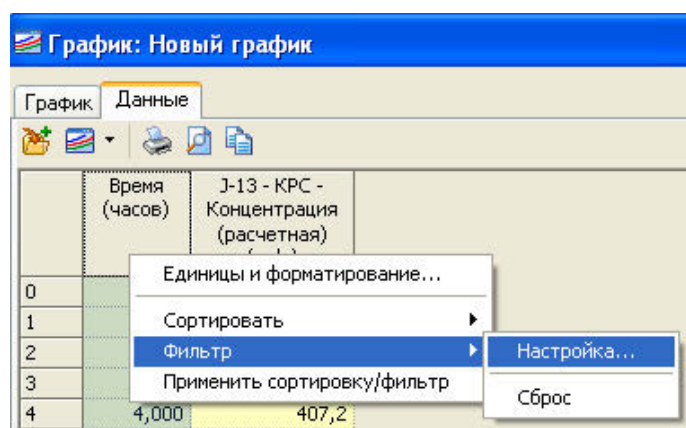


Рис. 10.16. Установка фильтра

---

Задайте параметры фильтрации в следующем окне (рис. 10.17).

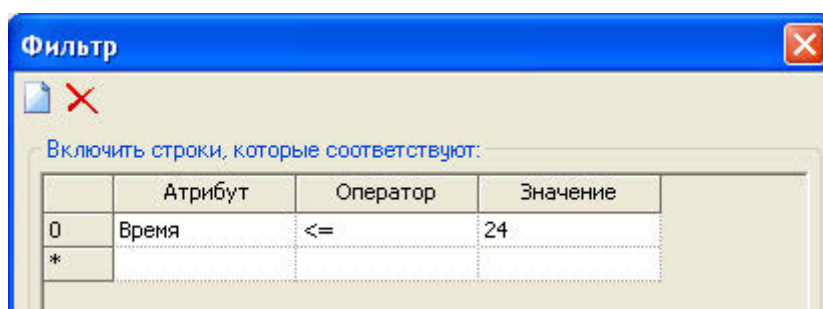


Рис. 10.17. Параметры фильтрации

Вы можете сравнить результаты своих расчетов с данными, представленными в графе *Модель 1* сводной таблицы (п. 10.2.7).

После завершения просмотра результатов сохраните проект.

### 10.2.3. Моделирование процесса смешения с уточненными начальными условиями

При выполнении расчетов по предыдущему сценарию начальная концентрация солей в водонапорных башнях не задавалась. По умолчанию она принята равной нулю. Можно убедиться, что с течением времени концентрация солей в башне Т-1 за 144 часа увеличивается до 254,7 мг/л, а в башне Т-2 до 255,7 мг/л

В данной части работы предлагаем вам выполнить расчеты при более реалистичных начальных условиях – при начальной концентрации солей в водонапорных башнях 300 мг/л.

Создайте новую дочернюю альтернативу *KPC-300* (рис. 10.18).

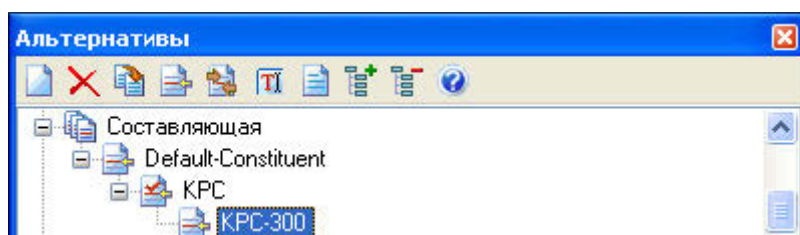


Рис. 10.18. Альтернатива KPC-300

Двойным щелчком по данной альтернативе откройте окно *Составляющая*, а в нем перейдите на вкладку *Резервуар с регулиру-*

емым уровнем воды и введите значения параметра *Концентрация (начальная)* 300 мг/л в обоих резервуарах (рис. 10.19).

	Скорость массовой реакции (локальная) $((\text{мг/л})^{(1-p)})/\text{день}$	Указать локальную массовую скорость?	Отсек 2 (%)	Отсек 1 (%)	Концентрация (начальная) (мг/л)	Массовая скорость (базовая) (мг/с)
122: T-2	0,000	<input type="checkbox"/>	0,0	100,0	300,0	
123: T-1	0,000	<input type="checkbox"/>	0,0	100,0	300,0	

Рис. 10.19. Ввод концентрации солей в резервуарах T-1, T-2

Другим параметром, который здесь можно задать, является модель перемешивания воды в резервуаре. WaterGEMS предлагает на выбор четыре модели.

Самая простая модель – *Полностью смешанный*. Модель предполагает, что вся вода, поступающая в резервуар, мгновенно и полностью перемешивается с водой, которая уже находится в нем.

Вторая модель в данной программе называется *2-отсечный* (рис. 10.20). Предполагается, что весь объем резервуара делится на два отсека, в каждом из которых вода полностью перемешана. Вода поступает в первый (нижний) отсек резервуара. Если количество воды, поступившей в этот отсек, превышает его объем (задается пользователем), то излишки «перетекают» во второй отсек, где происходит мгновенное и полное перемешивание с имеющейся там водой.

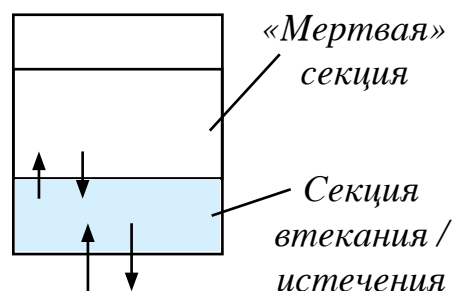


Рис. 10.20. «2-отсечная» модель смешения

Такой подход применяется с целью моделирования «мертвых» объемов резервуара.

Модель FIFO (First In First Out – «первым пришел, первым ушел») предполагает, что смешения в резервуаре вообще не проис-



ходит, но вход и выход потоков разделены. Например, вода поступает в резервуар сверху, а вытекает снизу (рис. 10.21).

Модель LIFO (Last In First Out – «последним пришел, первым ушел»), как и предыдущая, предполагает отсутствие смешения, но вход и выход воды осуществляется в нижней части резервуара. Эту модель рекомендуется использовать для имитации высоких и узких резервуаров (рис. 10.22).

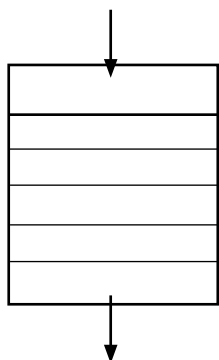


Рис. 10.21. Модель смешения  
*FIFO*

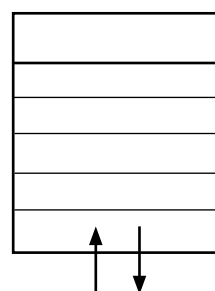




Рис. 10.22. Модель смешения  
*LIFO*

В данной серии расчетов мы рассмотрим более продолжительный период моделирования – 288 часов. По этой причине придется создать новый вариант расчетов с соответствующими опциями.

Нажмите кнопку  – *Опции расчета* или воспользуйтесь одноименным пунктом главного меню **Анализ**.

В окне *Опции расчета* установите курсор на пункт *Изменение концентрации за 144 часа* и нажмите кнопку  – *Дублировать*. Переименуйте новый вариант расчетов, назвав его, например, *Изменение концентрации за 288 часов* (рис. 10.23).

Двойным щелчком по этому пункту откройте окно свойств, где необходимо исправить только один параметр:

Продолжительность (часы)... 288

Откройте окно менеджера сценариев и создайте дочерний сценарий *КРС-300*. Сразу объявите его текущим (рис. 10.24).

Двойным щелчком откройте окно свойств нового сценария и укажите необходимые в данном случае альтернативы (рис. 10.25):

Составляющая.... *КРС-300*

Опции расчета... *Изменение концентрации за 288 часов*



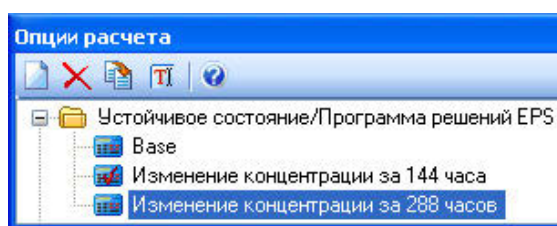


Рис. 10.23. Новый расчет



Рис. 10.24. Новый сценарий

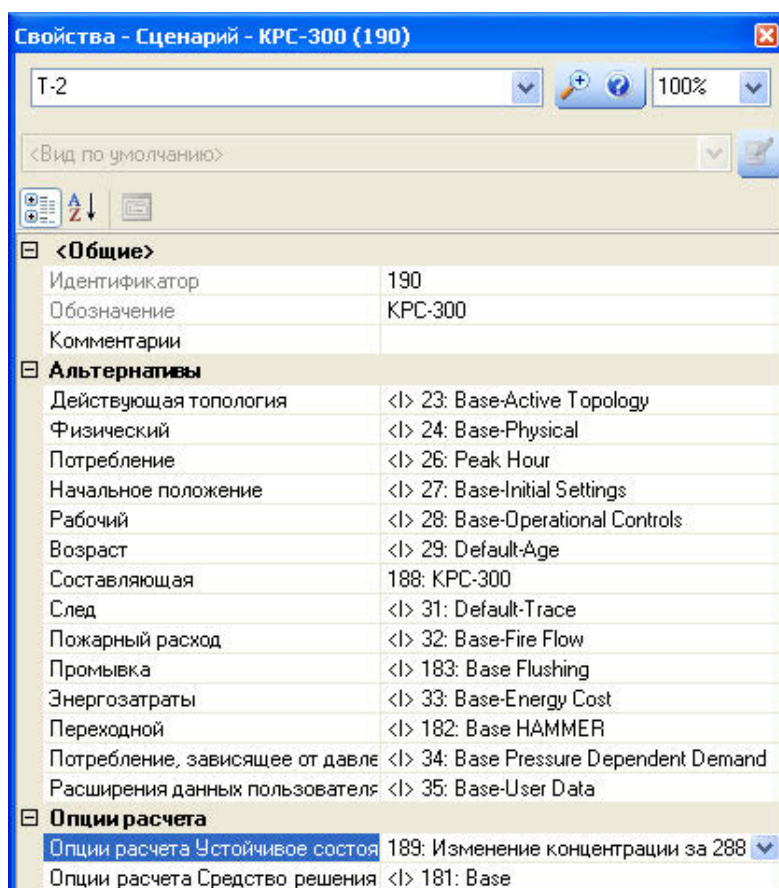




Рис. 10.25. Свойства сценария KPC-300

Завершите работу с менеджером сценариев, сохраните проект и выполните расчет. Вы можете сравнить результаты своих расчетов с данными, представленными в графе *Модель 2* сводной таблицы (п. 10.2.7).

#### 10.2.4. Расчет изменения концентрации веществ при химических реакциях

В данной части раздела будет рассмотрен расчет изменения концентрации какого-либо вещества (например, хлора) при наличии химических реакций.

На основе базовой альтернативы *Default-Constituent* создайте новую альтернативу *Хлорирование* и откройте окно ее свойств. На вкладке *Системные данные составляющей* нажмите кнопку  в поле *Составляющая*. Это приведет к открытию окна *Составляющие*. Нажмите кнопку  – *Создать* в левой части данного окна и введите обозначение процесса, который будет исследоваться. В нашем случае *Хлор*. Задайте

Диффузивность.....  $1,208e-009 \text{ м}^2/\text{с}$

Порядок массовой реакции.....  $1$

Скорость массовой реакции...  $0,3 \text{ (мг/л)}^{(1-n)}/\text{день}$

Скорость реакций, происходящих около твердых поверхностей трубопроводов, на данном этапе не учитываем (рис. 10.26).

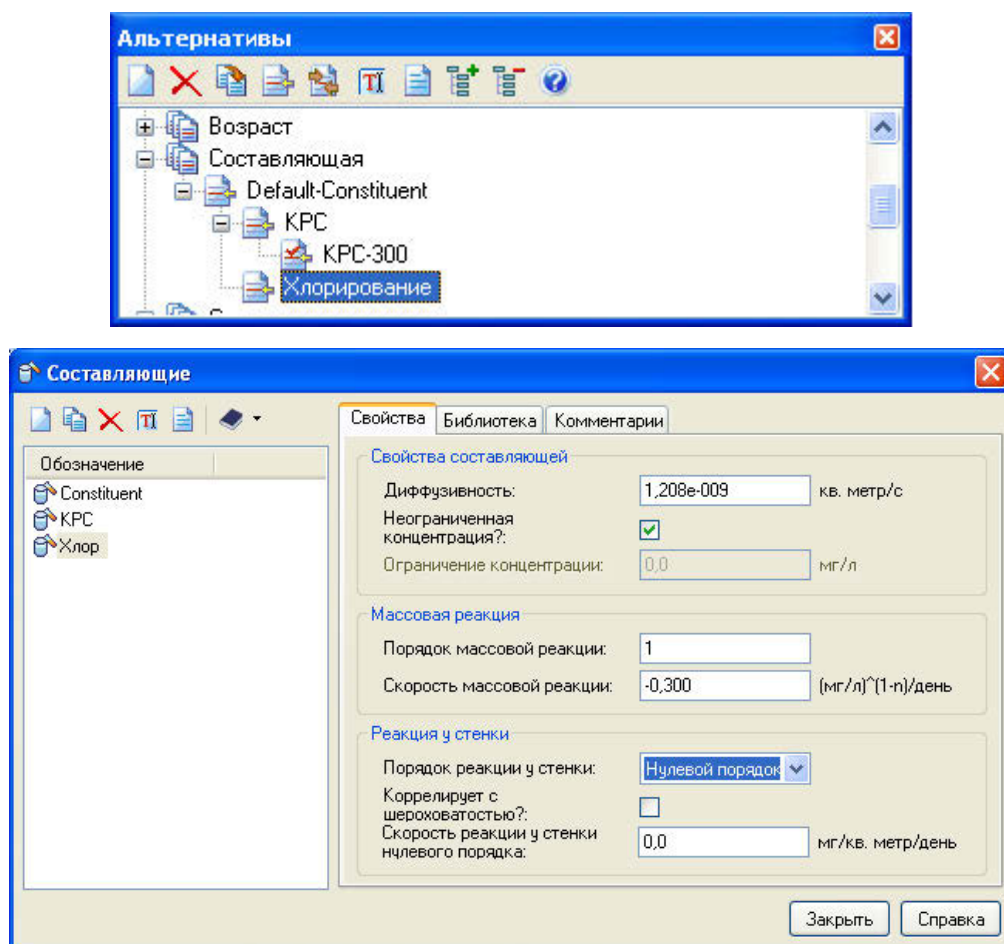


Рис. 10.26. Альтернатива «Хлорирование» и ее свойства

После ввода необходимых параметров нажмите кнопку *Закреть* и укажите наименование процесса *Хлор* в поле *Составляющая* окна *Составляющая*: *Хлорирование* (рис. 10.27).

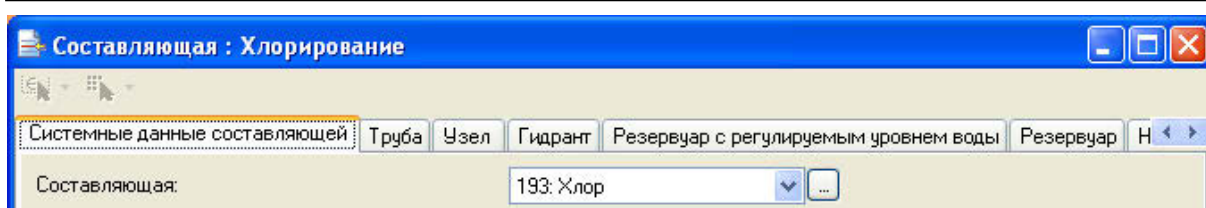


Рис. 10.27. Ввод составляющей

На вкладке *Резервуар* введите начальную концентрацию хлора 1 мг/л в резервуарах R-1 и R-3 (рис. 10.28).

	Обозначение	Концентрация (начальная) (мг/л)	Массовая скорость (базовая) (мг/с)	Концентрация (базовая) (мг/л)	
120: R-1	R-1	1,0	0,00	0,0	Нагн
121: R-3	R-3	1,0	0,00	0,0	Нагн

Рис. 10.28. Ввод начальной концентрации хлора в резервуарах

Создайте новый сценарий *Хлорирование-1*. Двойным щелчком откройте окно свойств сценария и укажите альтернативы (рис. 10.29):

Потребление..... *Peak Hour*

Составляющая... *Хлорирование*

Опции расчета... *Изменение концентрации за 144 часа*

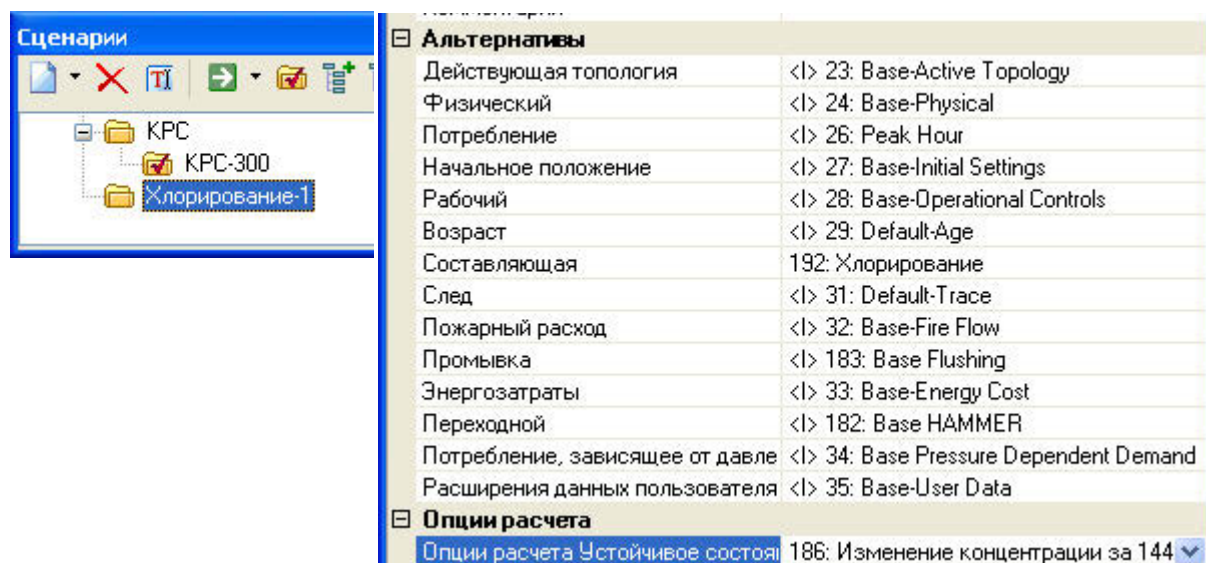


Рис. 10.29. Сценарий «Хлорирование-1» и его свойства

Завершите работу с менеджером сценариев, сохраните проект и выполните расчет. Вы можете сравнить результаты своих расчетов с данными, представленными в графе *Модель 3* сводной таблицы (п. 10.2.7).

Теперь выполним уточненный расчет изменения концентрации хлора с учетом химических реакций, проходящих у твердых поверхностей.

На основе альтернативы *Хлорирование* создайте новую альтернативу *Хлорирование + стенка* (рис. 10.30) и откройте окно ее свойств.

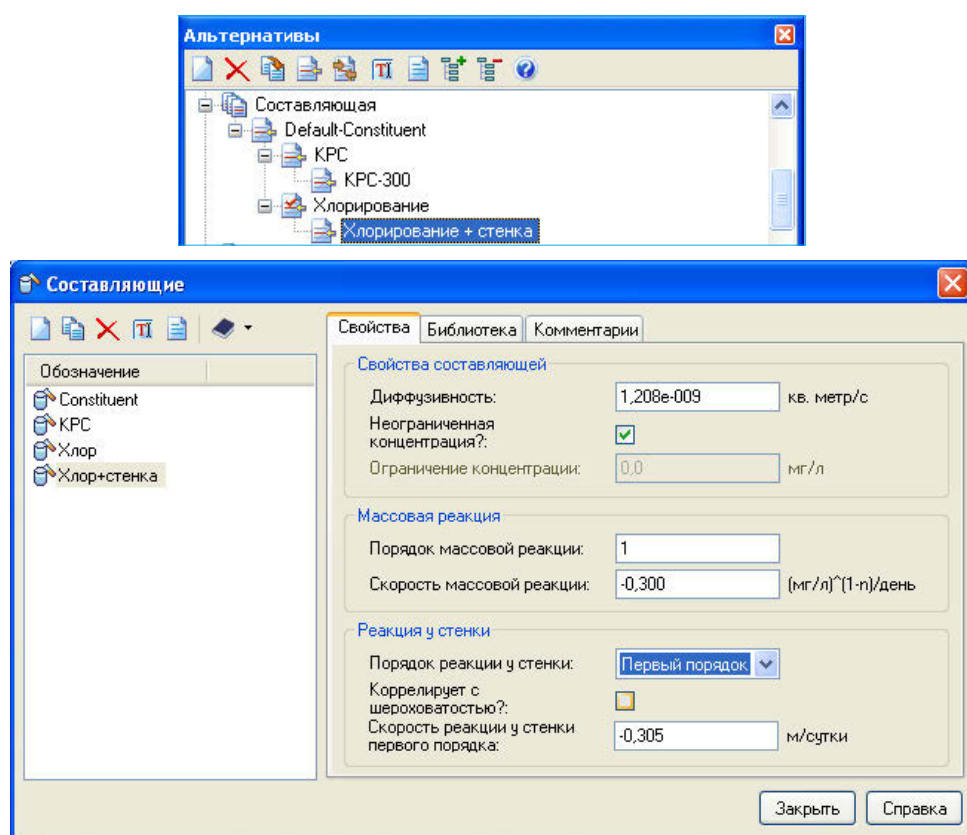




Рис. 10.30. Альтернатива «Хлорирование + стенка» и ее свойства

На вкладке *Системные данные* составляющей нажмите кнопку  в поле *Составляющая*. Это приведет к открытию окна *Составляющие*. Установите курсор на пункт *Хлор* на левой панели и нажмите кнопку  – *Дублировать*. Введите обозначение процесса, который будет исследоваться. В наше случае – *Хлор + Стенка*. Задайте (см. рис. 10.30):



Диффузивность.....  $1,208e-009 \text{ м}^2/\text{с}$   
 Порядок массовой реакции.....  $1$   
 Скорость массовой реакции...  $0,3 \text{ (мг/л)}^{(1-n)}/\text{день}$   
 Порядок реакции у стенки..... *Первый порядок*  
 Скорость реакции у стенки.....  $-0,305 \text{ м/сутки}$

После ввода необходимых параметров нажмите кнопку *Заккрыть* и укажите наименование процесса *Хлор + Стенка* в поле *Составляющая* окна *Составляющая: Хлорирование + стенка* (рис. 10.31).

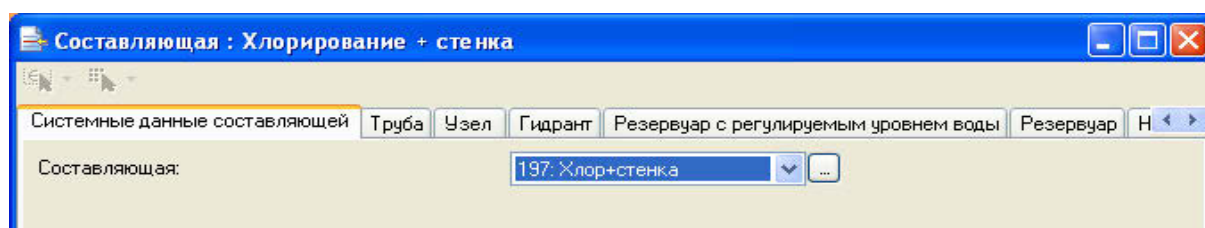


Рис. 10.31. Ввод составляющей

Завершите работу с менеджером альтернатив. Создайте новый сценарий *Хлорирование-2*.

Двойным щелчком откройте окно свойств сценария и укажите альтернативы (рис. 10.32):

Потребление..... *Peak Hour*  
 Составляющая... *Хлорирование + стенка*  
 Опции расчета... *Изменение концентрации за 288 часов*

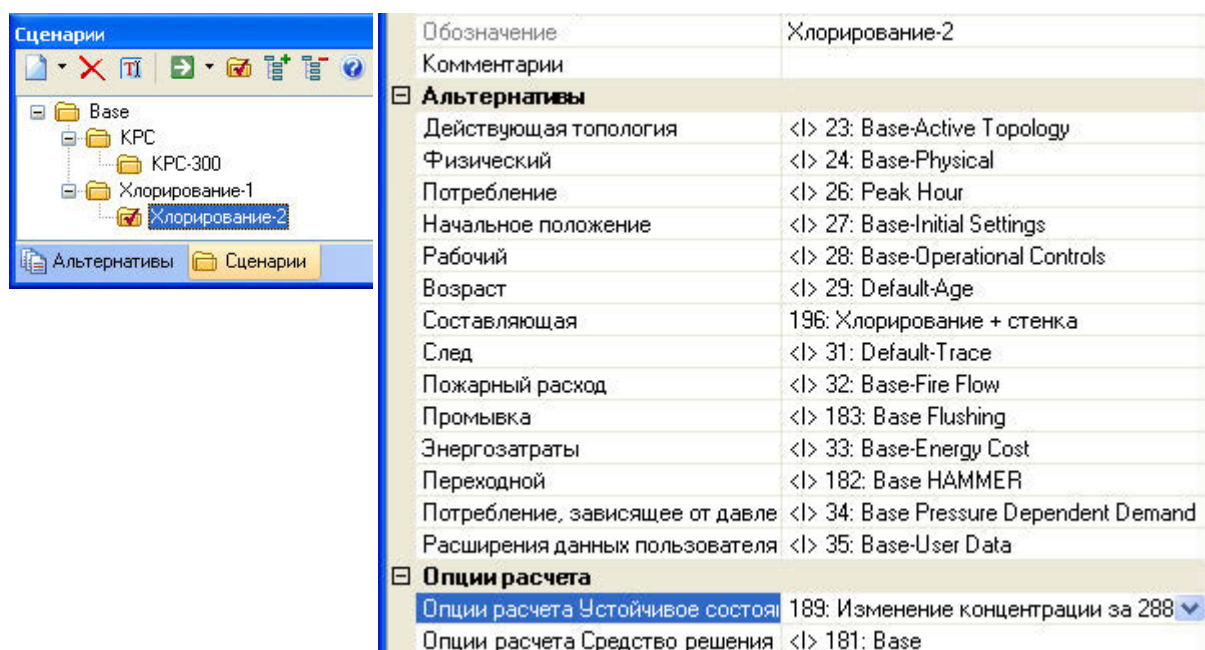


Рис. 10.32. Сценарий «Хлорирование-2» и его свойства

Объявите данный сценарий текущим, сохраните проект и выполните расчет. Вы можете сравнить результаты своих расчетов с данными, представленными в графе *Модель 4* сводной таблицы (п. 10.2.7).

### 10.2.5. Возраст воды

Если пользователь не располагает надежными данными о скоростях химических реакций, концентрациях растворенных веществ, то об изменении качества воды можно судить по ее возрасту, т. е. времени, в течение которого она поступает от источников к потребителям.

На основе альтернативы *Возраст – Default-Age* создайте новую альтернативу *Время* и откройте окно ее свойств (рис. 10.33).

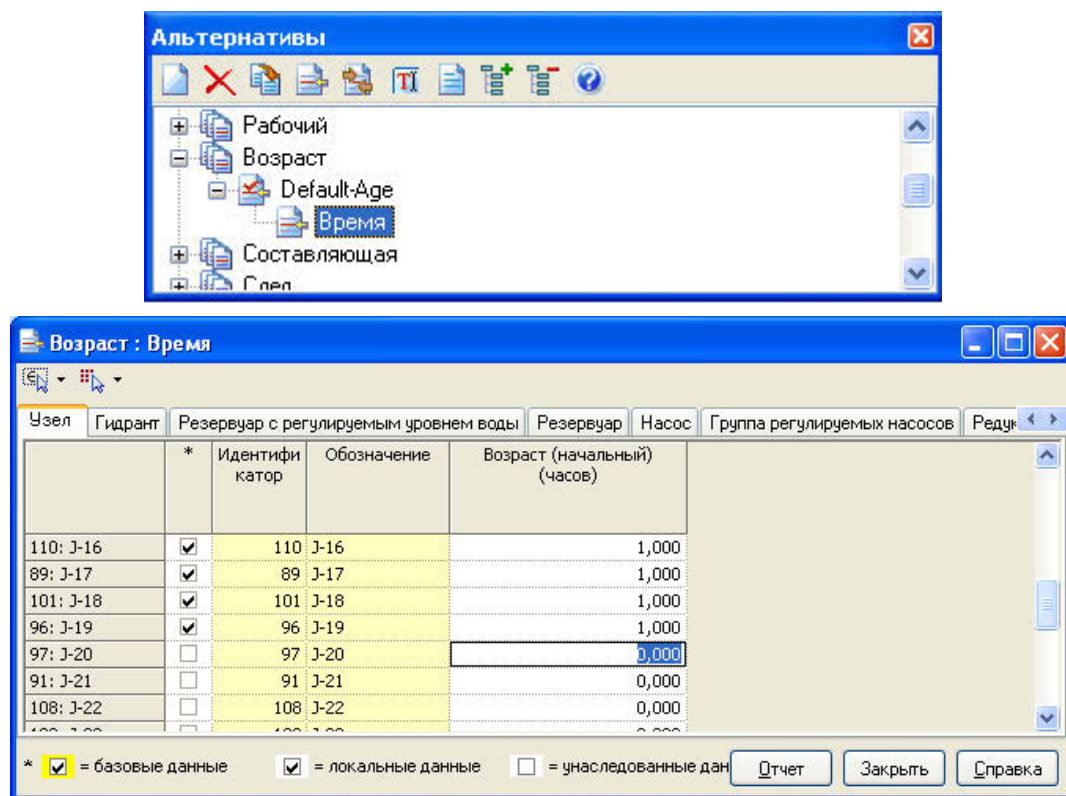


Рис. 10.33. Альтернатива для расчета возраста воды и ее свойства

На вкладке *Узел* (см. рис. 10.33) задайте для определенности начальный возраст 1 час в узлах с номерами от J-1 по J-19 (для удобства отсортируйте эту колонку по возрастанию обозначений).

Перейдите на вкладку *Резервуар* и убедитесь, что начальный возраст воды, подаваемой в сеть, нулевой (рис. 10.34).



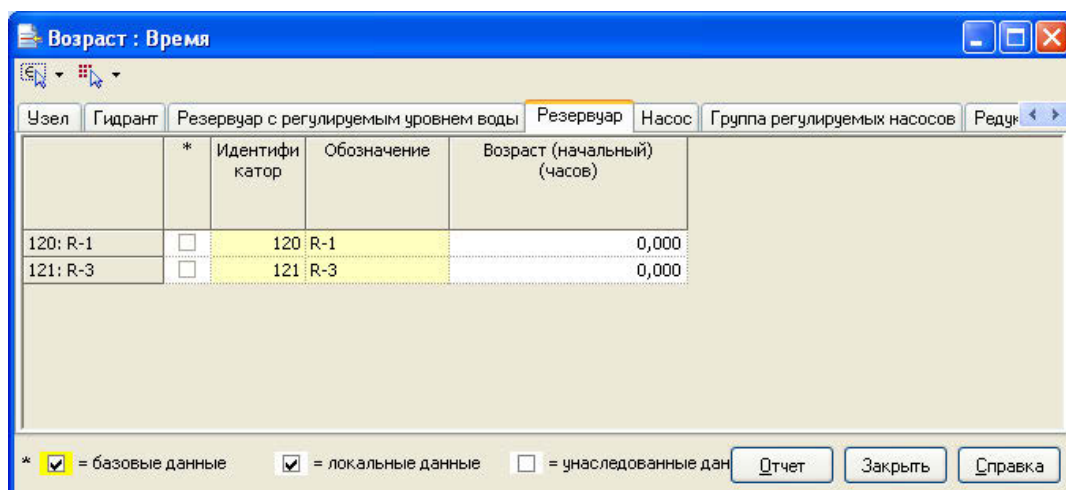


Рис. 10.34. Возраст воды в резервуарах

Перейдите на вкладку *Резервуар с регулируемым уровнем* и введите начальный возраст воды 72 часа (3 дня) в водонапорных башнях Т-1 и Т-2. Опыт показывает, что в большинстве случаев именно за такое время происходит полное обновление объемов воды в водонапорных башнях (рис. 10.35). После ввода этих данных завершите работу с менеджером альтернатив.

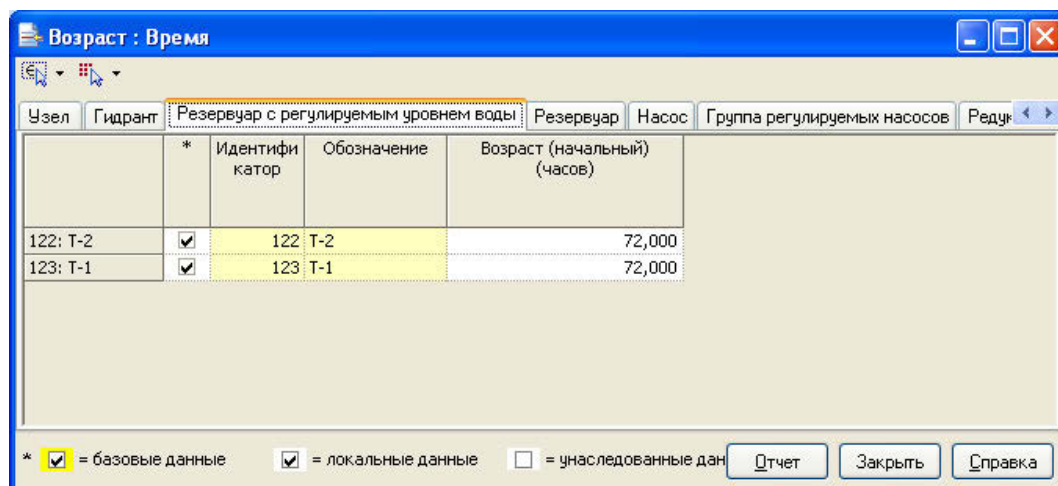




Рис. 10.35. Возраст воды в резервуарах с регулируемым уровнем

Теперь необходимо задать параметры расчета. С этой целью нажмите кнопку  – *Опции расчета* или воспользуйтесь одноименным пунктом главного меню **Анализ**.

Установите курсор на пункт *Устойчивое состояние / Программа решений EPS* и нажмите кнопку  – *Создать*. Сразу переименуйте новый вариант расчетов, назвав его, например, *Возраст 144 часа*.

Двойным щелчком по этому пункту откройте окно свойств. Необходимо указать (рис. 10.36):

Тип расчета..... *Возраст*  
 Базовая дата..... *Текущая дата*  
 Время начала..... *00:00:00*  
 Продолжительность..... *144*  
 Гидравлический такт... *1*

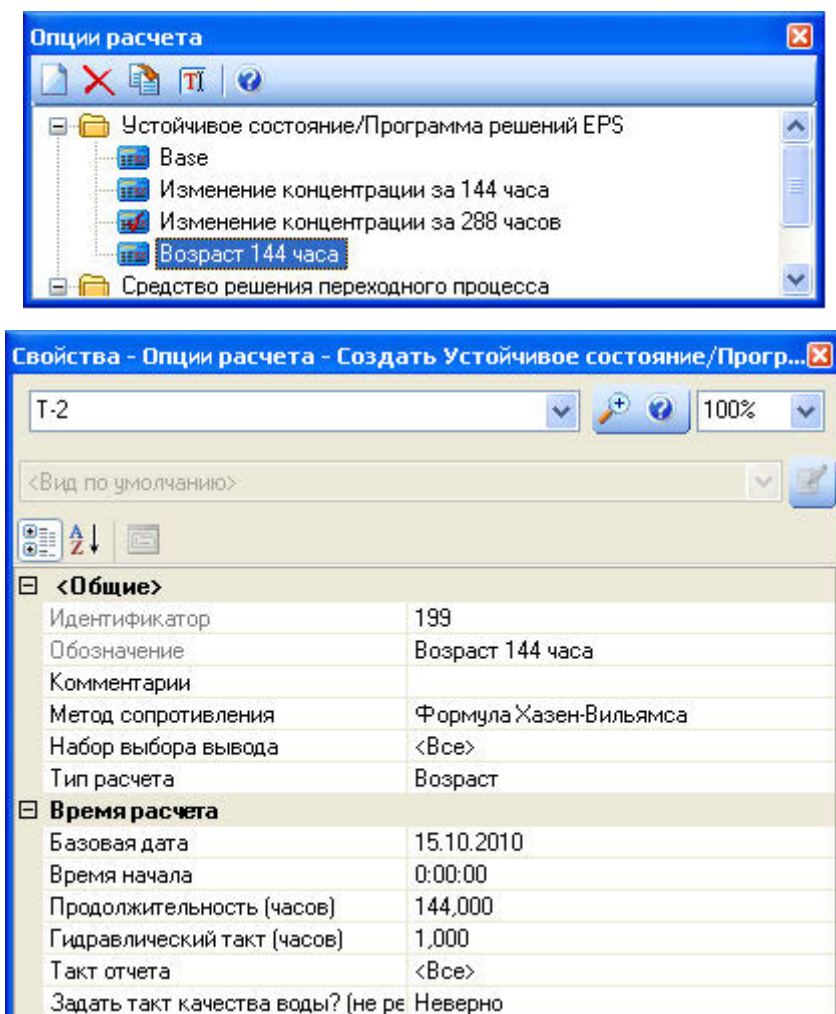


Рис. 10.36. Новый расчет и его свойства

Сразу же создайте еще один вариант расчетов *Возраст 288 часов*. Его опции отличаются от предыдущего случая только продолжительностью моделирования – 288 часов (рис. 10.37).

Создайте новый сценарий *Возраст 144* на основе базового. Укажите альтернативы:

Возраст..... *Время*  
 Опции расчета «Устойчивое состояние»... *Возраст 144 часа*

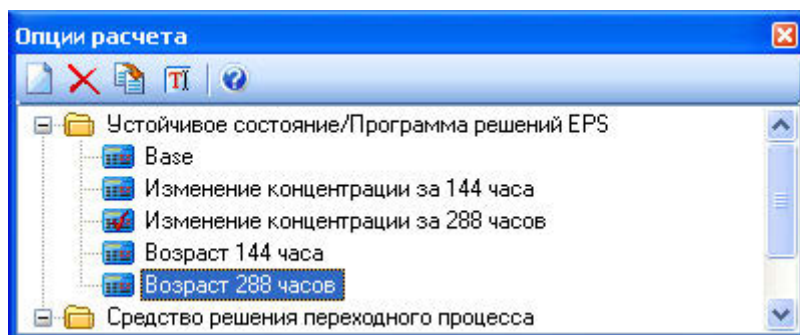


Рис. 10.37. Вариант расчетов «Возраст 288 часов»

Закройте окно свойств сценария *Возраст 144*, объявите его текущим и выполните расчет.

Постройте графики изменения возраста воды в водонапорных башнях Т-1, Т-2 (рис. 10.38). Обратите внимание, что возраст воды в этих резервуарах не выравнивается.

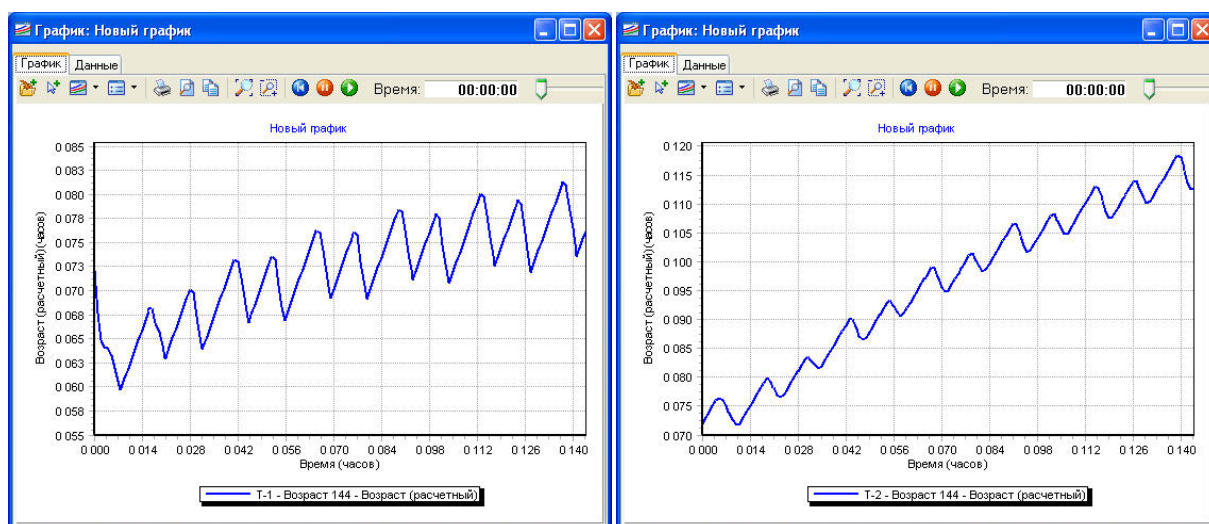


Рис. 10.38. Изменение возраста воды в резервуарах с регулируемыми уровнями

Предлагаем вам самостоятельно выполнить моделирование для более продолжительного периода – 288 часов при начальном возрасте воды в резервуаре Т-1 72 часа, а в резервуаре Т-2 – 144 часа. Вы можете сравнить результаты своих расчетов с данными, представленными в графе *Модель 5* сводной таблицы (п. 10.2.7).

---

### 10.2.6. След источника

WaterGEMS предоставляет возможность проанализировать распределение воды по ее потребителям при водоснабжении сети от различных источников. Для определенности рассмотрим источник R-1.

Для выполнения этих расчетов создайте новую дочернюю альтернативу *След R-1* на основе альтернативы *След – Default Trace* (рис. 10.39).

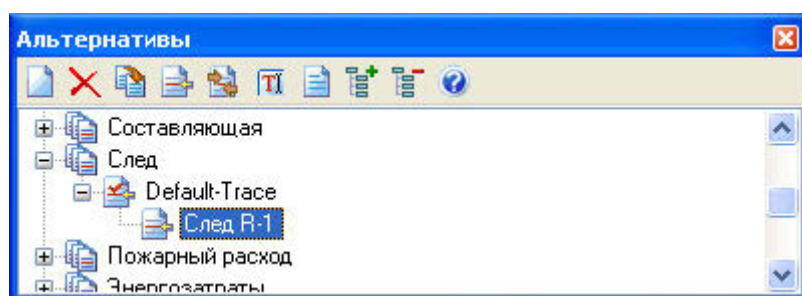



Рис. 10.39. Альтернатива «След R-1»

Откройте окно ее свойств (рис. 10.40) и на вкладке *Системные данные следа* задайте *Элемент следа* R-1 (после нажатия кнопки  вам будет предложено выбрать его из схемы).

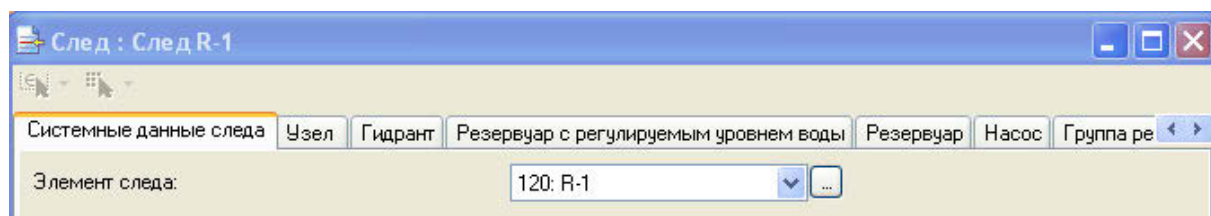


Рис. 10.40. Окно свойств альтернативы «След»

Далее перейдите на вкладку *Узел* (рис. 10.41). Здесь необходимо задать параметр *След (начальный) %*. Введите 80 % во всех узлах (рекомендуем воспользоваться инструментом *Глобальное редактирование*). Указанное значение, конечно, ориентировочное.

Перейдите на вкладку *Резервуар с регулируемым уровнем* и введите то же значение для резервуаров T-1, T-2.

Закройте окно свойств альтернативы.

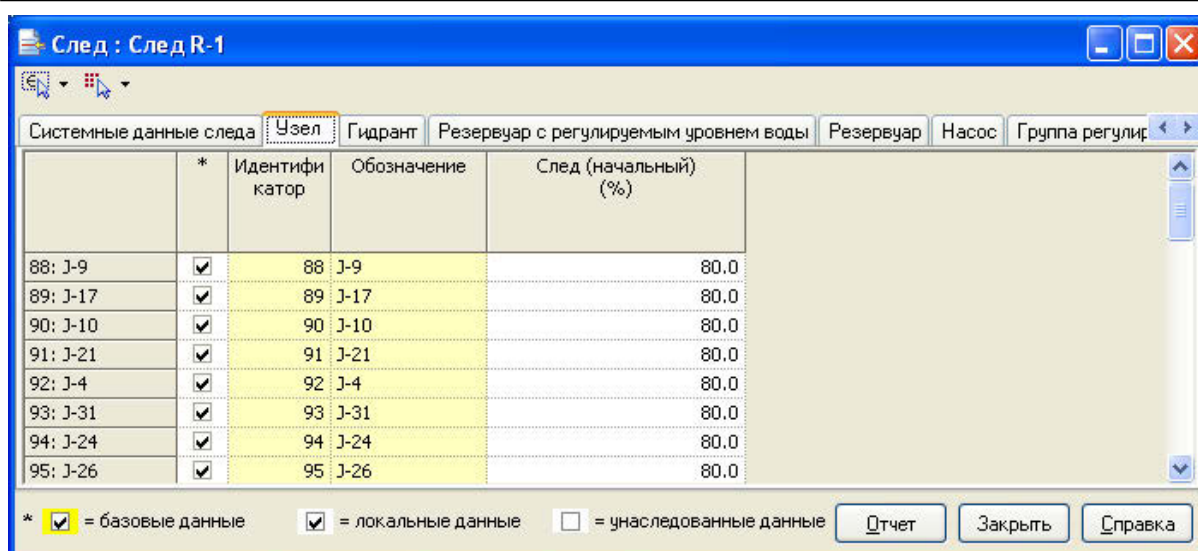


Рис. 10.41. Вкладка «Узел» альтернативы «След»

Теперь необходимо задать параметры расчета. С этой целью нажмите кнопку – *Опции расчета* или воспользуйтесь одноименным пунктом главного меню **Анализ**.

Создайте новый вариант расчетов *След – 450* (рис. 10.42).

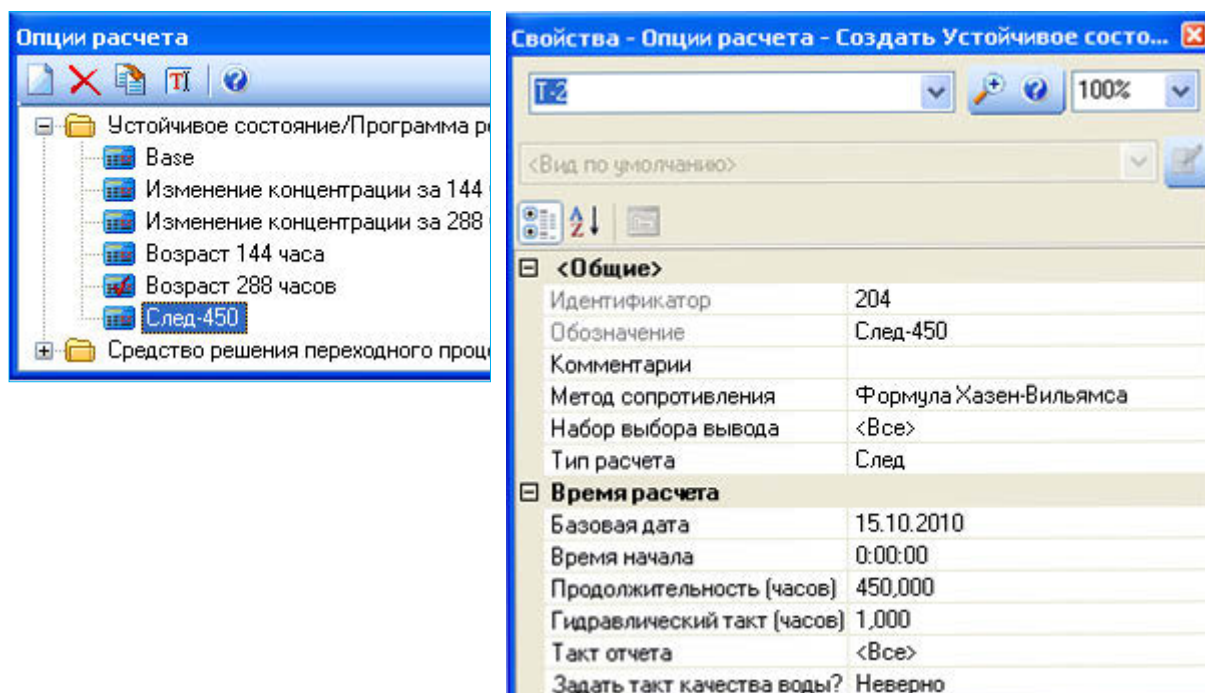


Рис. 10.42. Вариант расчета «След» и его свойства

Двойным щелчком по этому пункту откройте окно свойств. Необходимо указать:

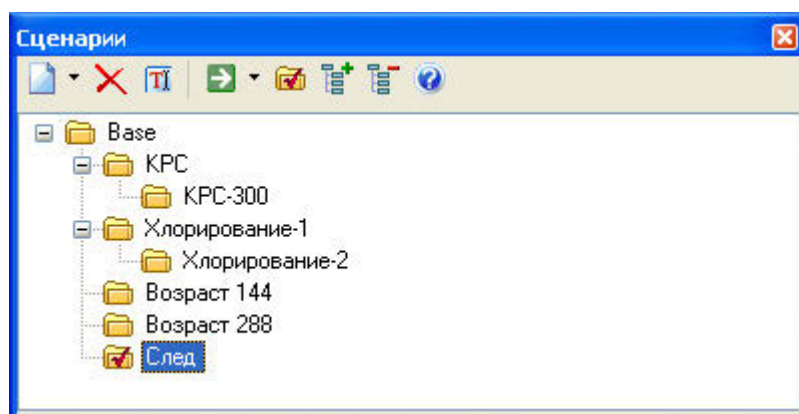


---

Тип расчета..... *След*  
Базовая дата..... *Текущая дата*  
Время начала..... *00:00:00*  
Продолжительность (часы).... *450*  
Гидравлический такт (часы)... *1*

Создайте новый сценарий *След* (рис. 10.43) и задайте необходимые альтернативы:

След..... *След R-1*  
Опции расчета «Устойчивое состояние»... *След – 450*



*Рис. 10.43. Новый сценарий «След»*

Выполните расчет сценария. Вы можете сравнить результаты своих расчетов с данными, представленными в графе *Модель б* сводной таблицы (п. 10.2.7).



---

### 10.2.7. Сравнение результатов расчетов

Таблица 10.1

Результаты расчетов изменения параметров  
за последние 24 часа расчетных периодов

Узел	Условие	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6
		КРС (мг/л)	КРС- 300 (мг/л)	Хлор-1 (мг/л)	Хлор-2 (мг/л)	Возраст (часы)	След (%)
Т-1	Нач. зна- чение	0	300	0	0	72	80
Т-2	Нач. зна- чение	0	300	0	0	144	80
Ј-13	Мин.	250	250,0	1,0	0,8	0,78	47
Ј-13	Макс.	435,6	435,6	1,0	0,9	1,35	100
Ј-3	Мин.	241,0	259,7	0,6	0,4	1,18	58,7
Ј-3	Макс.	394,6	394,6	1,0	0,8	63,5	97,2
Т-1	Мин.	238,0	297,3	0,4	0,3	74,7	85,4
Т-1	Макс.	254,7	300,0	0,5	0,4	84,0	86,1
Т-2	Мин.	232,1	369,4	0,3	0,2	137,5	62,9
Т-2	Макс.	255,7	371,5	0,3	0,2	146,0	63,3

---

## 11. Анализ работы сети при отключении ее сегментов

### 11.1. Постановка задачи

В этом разделе будет рассмотрен анализ заданной сети, в которой присутствуют изолирующие задвижки, с точки зрения ее работы при отключении тех или иных ее частей – сегментов, т. е. групп взаимосвязанных трубопроводов, которые могут быть отключены с помощью изолирующих задвижек.

Для поиска сегментов сети и анализа возможных проблем, связанных с их отключением, предназначен специальный инструмент *Критичность*.

Проект, который будет далее рассмотрен, создан заранее и хранится в файле *Criticality.wtg* (предоставлен фирмой Bentley). Схема сети показана на рис. 11.1.

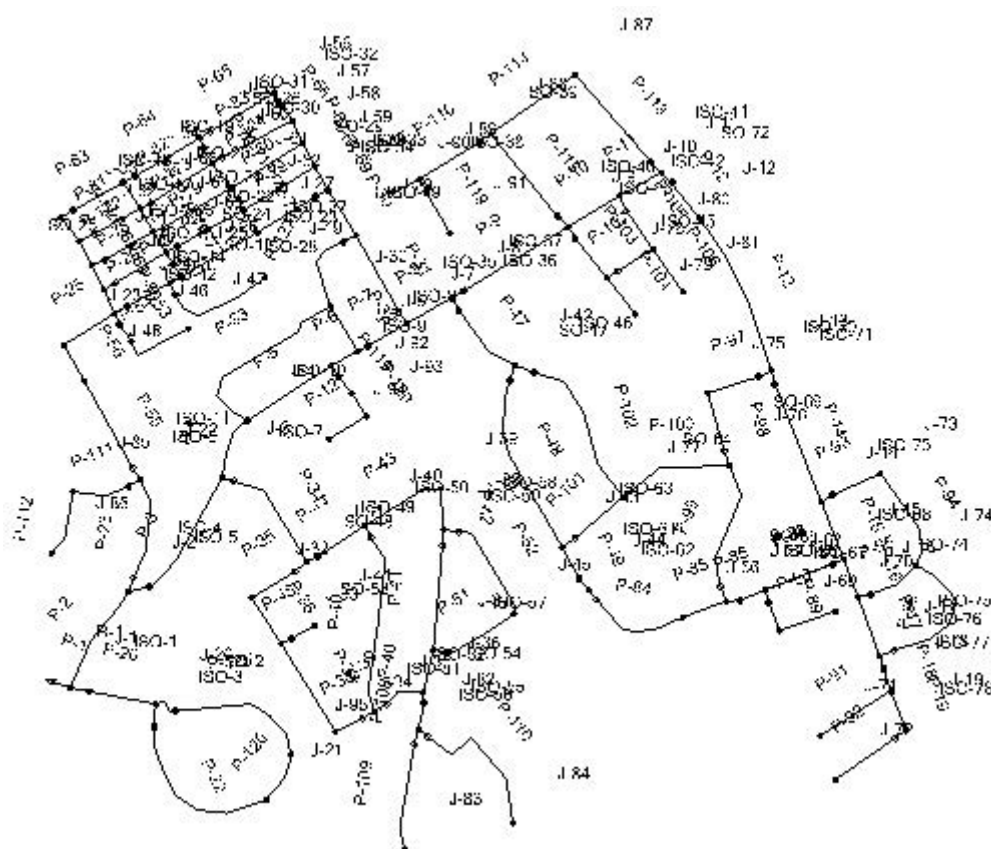


Рис. 11.1. Схема сети

Источник воды R-1 расположен в левой нижней части схемы. Найдите его с помощью средств поиска элементов.

Обратите внимание на наличие изолирующих задвижек, имеющих обозначения ISO, которые установлены на большинстве трубопроводов (рис. 11.2).

Двойным щелчком по какой-либо задвижке откройте окно свойств и познакомьтесь с его содержимым (рис. 11.3).

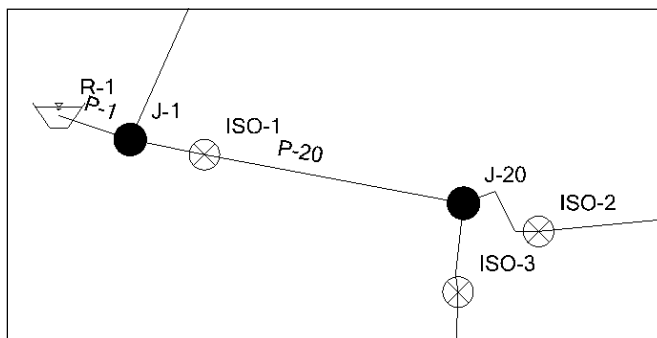


Рис. 11.2. Задвижки в окрестности резервуара R-1

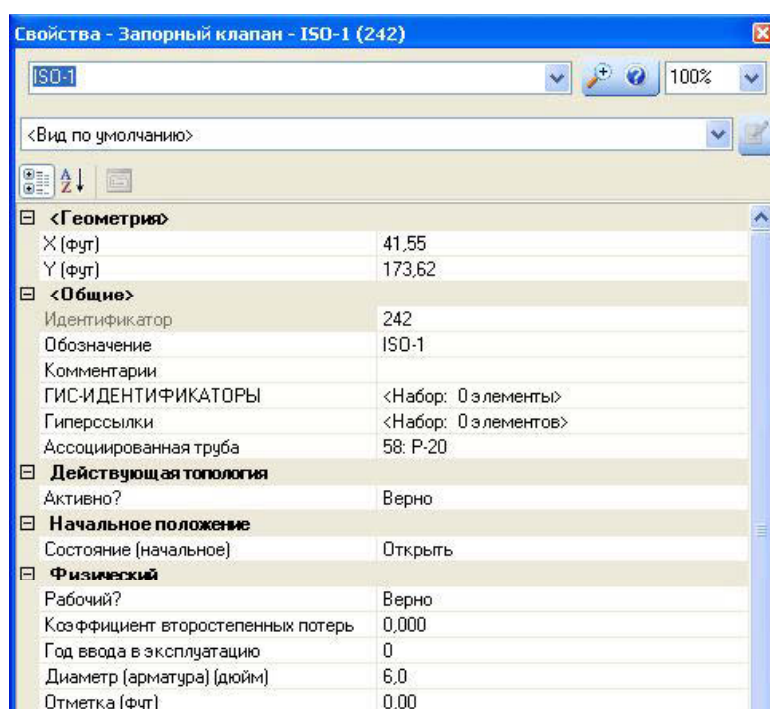


Рис. 11.3. Свойства изолирующей задвижки

В пункте *Ассоциированная труба* указан трубопровод, на котором установлена данная задвижка. Хотя на схеме задвижки изображены непосредственно на трубах, геометрически они с ними не связаны. С помощью мыши вы можете сдвинуть изображение задвижки, но это не отразится на конфигурации сети. Связь задвижки с трубой также потеряна не будет. В исходном файле заданы нулевые высотные отметки задвижек, но для выполнения данной работы это не имеет значения.


## 11.2. Сегментация схемы сети

В процессе эксплуатации сети довольно часто возникают вопросы типа:

– какие задвижки необходимо перекрыть для отключения от сети каких-либо потребителей?

– каким образом следует изолировать тот или иной трубопровод с целью его ремонта?

Для ответа на подобные вопросы выполняется операция поиска сегментов сети.

С помощью кнопки  – *Критичность* откройте окно менеджера поиска сегментов сети. С той же целью можно воспользоваться пунктом меню **Анализ – Критичность** (рис. 11.4).

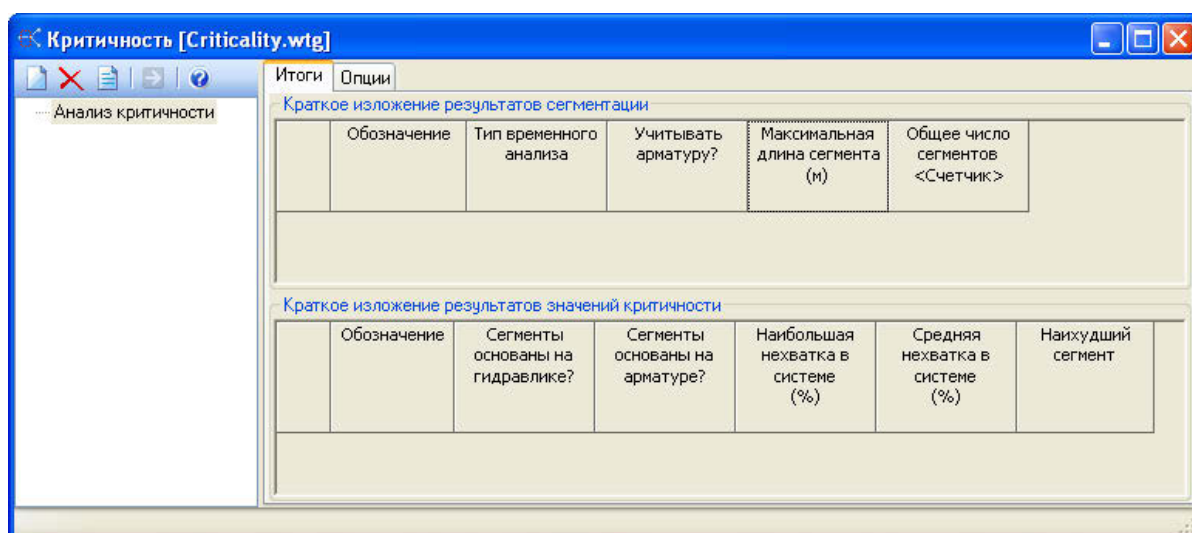


Рис. 11.4. Стартовое окно инструмента «Критичность»

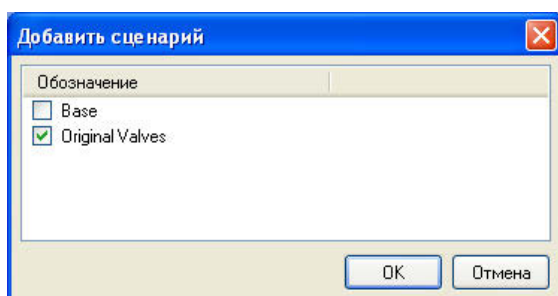



Рис. 11.5. Окно добавления сценария

Нажмите кнопку  – *Создать*. Это приведет к появлению окна *Добавить сценарий* (рис. 11.5), в котором нужно отметить пункт *Original Valves* (исходные задвижки).

После нажатия кнопки *OK* вид окна *Критичность* изменится. На его вкладке *Диапазон сегментации* укажите, что будет анализироваться вся сеть (рис. 11.6).

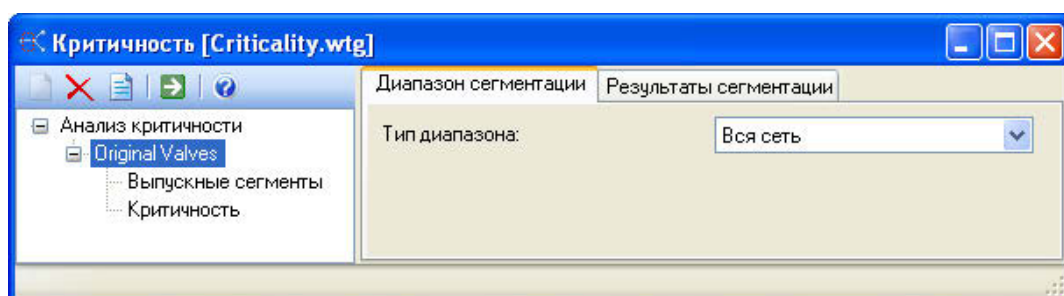



Рис. 11.6. Указание диапазона поиска сегментов

Нажмите кнопку  – *Рассчитать* в окне *Критичность*. В ходе выполнения расчетов на экране может появиться предупреждение о необходимости обновления данных (рис. 11.7). На вопрос программы следует дать утвердительный ответ.

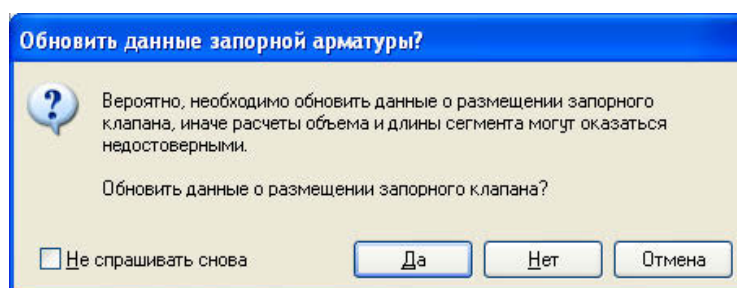


Рис. 11.7. Предупреждение программы

После завершения расчета на экран будут выведены его результаты (рис. 11.8).

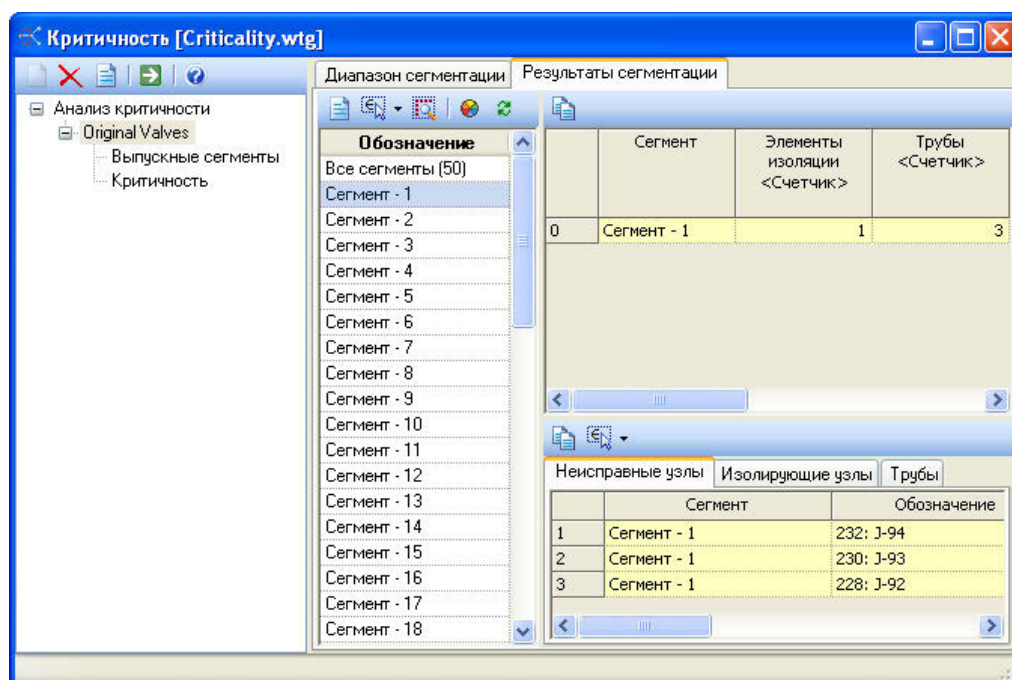


Рис. 11.8. Результаты определения сегментов

---

Таблица содержит некоторые статистические данные по каждому из найденных сегментов, а также цвета, которыми они будут отображены на схеме.

Для удобства просмотра рекомендуем сместить окно *Критичность*, чтобы схема сети была видна полностью (рис. 11.9).

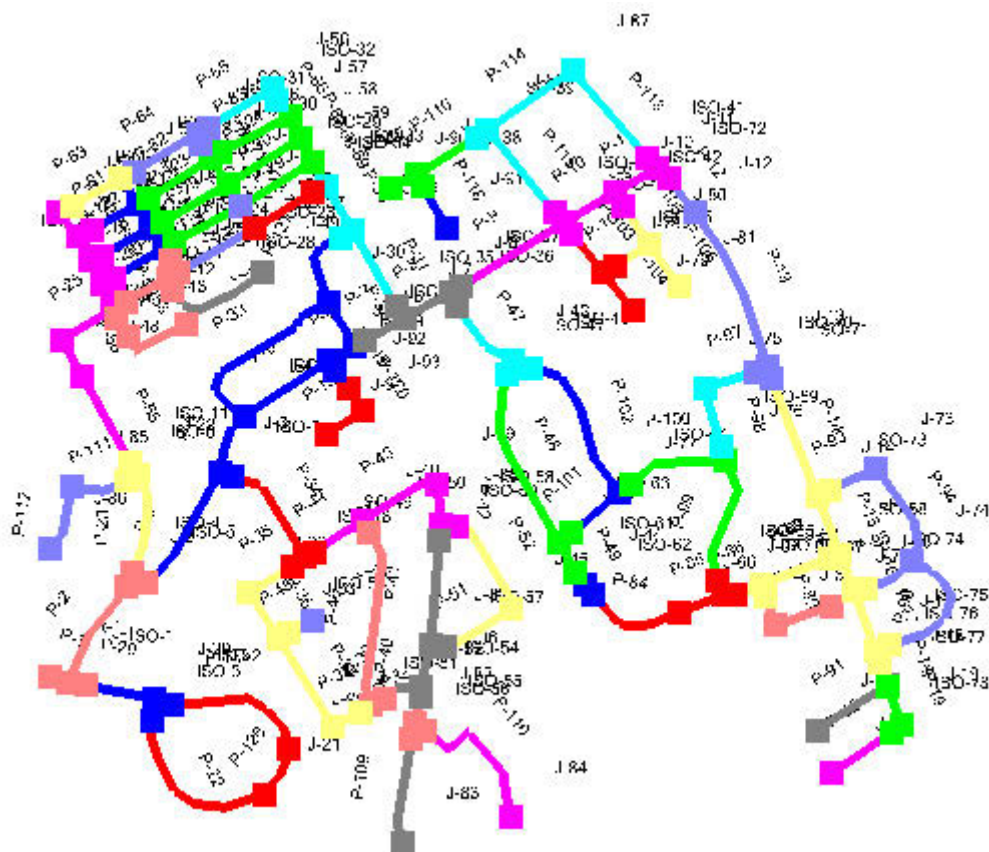




Рис. 11.9. Сегменты на схеме сети

Для отображения какого-либо отдельного сегмента (например, *Сегмента-1*) выделите его на панели *Критичность* и нажмите кнопку  – *Выделить сегменты* (рис. 11.10). С помощью кнопки  – *Масштабировать до сегментов* можно увеличить размер изображения.

Обратите внимание, что термином *Неисправные узлы* обозначены узлы (J-92, J-93, J-94), входящие в данный сегмент сети. Термином *Изолирующие узлы* обозначены задвижки, при закрытии которых данный сегмент отключается от сети, например с целью выполнения ремонтных работ (ISO-9).



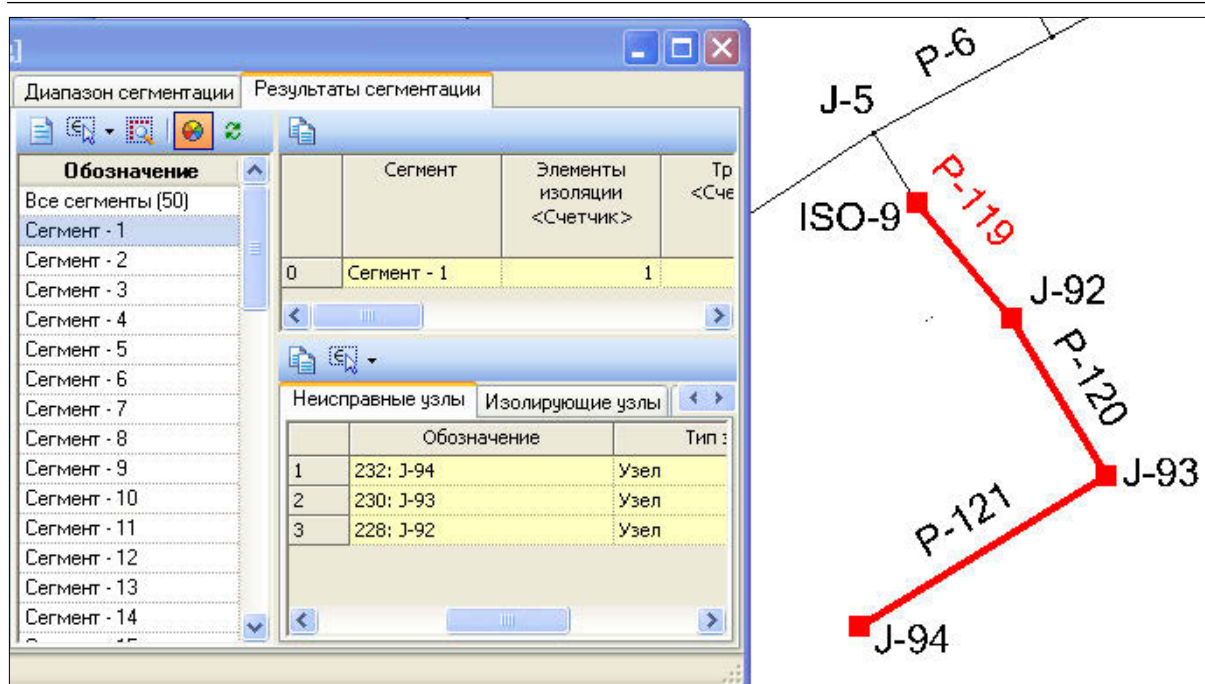


Рис. 11.10. Отображение отдельного сегмента

Рассмотрим другие возможности инструмента *Критичность*. Найдём сегмент, для отключения которого потребуется перекрыть больше всего задвижек. С этой целью выделите строку *Все элементы*. Щелчком правой кнопки мыши на заголовке столбца *Элементы изоляции <Счетчик>* откройте контекстное меню и укажите его пункт *Сортировать по убыванию*. В нашем случае максимальное количество задвижек (9) требуется для изоляции сегментов № 20 и № 21. На рис. 11.11 показан сегмент № 20.

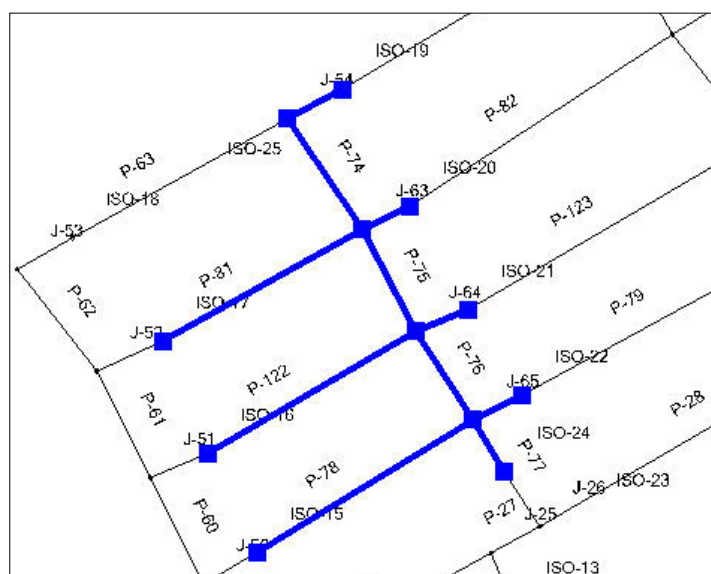



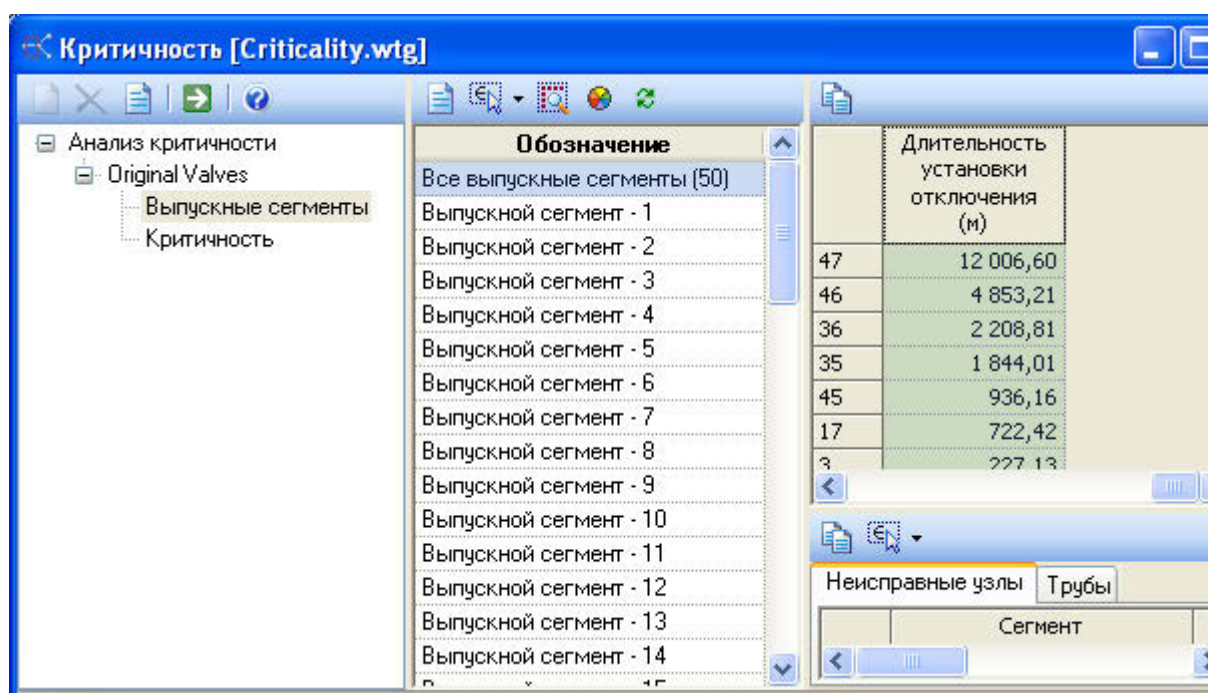
Рис. 11.11. Сегмент № 20

Предлагаем вам самостоятельно найти сегмент, при отключении которого пострадают больше всего потребителей (очевидно, он должен включать максимальное число узлов).

### 11.3. Поиск выпускных сегментов

Выпускными называются сегменты, расположенные ниже по течению относительно какого-либо конкретного сегмента. Иными словами, это те сегменты, к которым не будет поступать вода при отключении какого-то конкретного сегмента.

На левой панели окна *Критичность* установите курсор на пункт *Выпускные сегменты* и нажмите кнопку  – *Рассчитать*. После завершения расчетов отсортируйте сегменты по убыванию их длины (колонок *Длительность установки отключения\**). Результат показан на рис. 11.12.



Критичность [Criticality.wtg]

Анализ критичности

- Original Valves
  - Выпускные сегменты
  - Критичность

Обозначение	Длительность установки отключения (м)
Все выпускные сегменты (50)	
Выпускной сегмент - 1	
Выпускной сегмент - 2	
Выпускной сегмент - 3	
Выпускной сегмент - 4	
Выпускной сегмент - 5	
Выпускной сегмент - 6	
Выпускной сегмент - 7	
Выпускной сегмент - 8	
Выпускной сегмент - 9	
Выпускной сегмент - 10	
Выпускной сегмент - 11	
Выпускной сегмент - 12	
Выпускной сегмент - 13	
Выпускной сегмент - 14	

Неисправные узлы	Трубы
Сегмент	

Рис. 11.12. Длины выпускных сегментов

В данном случае наибольшей длиной обладает выпускной сегмент № 48. Отобразите его на схеме (рис. 11.13). Обратите внимание, что выше него по течению расположен сегмент, включающий источник водоснабжения. Очевидно, что при его отключении без воды останется вся сеть.

\* Вероятно, здесь допущена опечатка: должно быть «длина», а не «длительность».



Рис. 11.13. Сегмент № 48

## 11.4. Критические сегменты

На левой панели окна *Критичность* установите курсор на пункт *Критичность*. На правой панели необходимо отметить пункт *Запустить механизм расчета гидравлики* (рис. 11.14).

Выполните расчет.

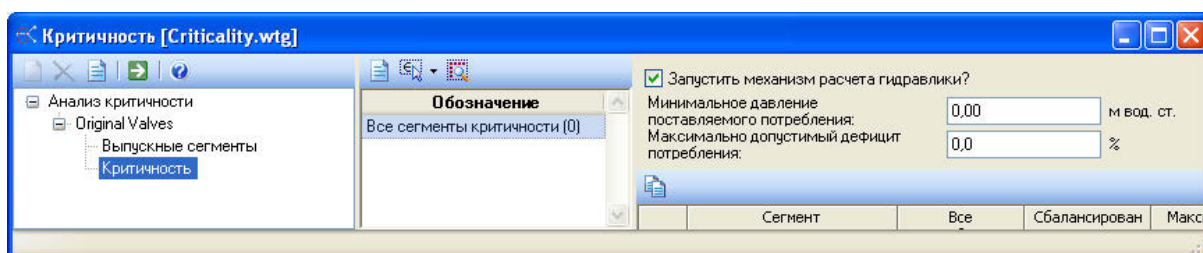


Рис. 11.14. Окно поиска критических сегментов

В результате проведенных расчетов программа покажет, как отключение того или иного сегмента отразится на водоснабжении потребителей (рис. 11.15). Рекомендуем выполнить сортировку результатов по уменьшению значений в колонке *Дефицит потребе-*

ния системы (%). Нумерация сегментов совпадает с предыдущим расчетом.

Критичность [Criticality.wtg]

Запустить механизм расчета гидравлики? ☒

Минимальное давление поставляемого потребления: 0,00 м вод. ст.

Максимально допустимый дефицит потребления: 0,0 %

	Потребленная системой подача (л/с)	Подаваемая системой подача (л/с)	Дефицит потребления системы (%)	Узел с наибольшим дефицитом потребления в процентах	Дефицит потребления наихудшей (%)
47	38,49	0,00	100,0	19: J-1	
46	38,49	21,14	45,1	31: J-7	
36	38,49	28,08	27,0	23: J-3	
45	38,49	29,02	24,6	35: J-9	

Неисправные узлы		Изолирующие узлы		Трубы	
№	Сегмент	№	Обозначение	№	Тип элемента
1	Сегмент критичности - 48	19:	J-1		Узел
2	Сегмент критичности - 48	21:	J-2		Узел
3	Сегмент критичности - 48	23:	J-3		Узел
4	Сегмент критичности - 48	25:	J-4		Узел

Рис. 11.15. Результат расчета критичности

## 11.5. Улучшение схемы

Ранее мы определили, что наибольшую длину (12 006,6 м) имеет выпускной сегмент № 48. Он соответствует отключению трубопроводов, непосредственно примыкающих к источнику водоснабжения. Иначе говоря, практически все потребители сети при аварии на данных трубопроводах окажутся без воды.

Несколько меньшие длины – 4 853,21 м и 2 208,81 м имеют сегменты № 47 и № 37 соответственно. Можно ли уменьшить эти длины?

На данном этапе работы проанализируем схему с дополнительным трубопроводом, соединяющим узлы J-44 и J-45, с двумя изолирующими задвижками.

С этой целью необходимо создать новый сценарий с альтернативной топологией сети.

Сначала создайте новую альтернативу *Новая схема* на основе базовой альтернативы *Действующая топология – Base Active Topology – W-Valves* (рис. 11.16).

Далее создайте новый сценарий *Новая схема* (рис. 11.17).



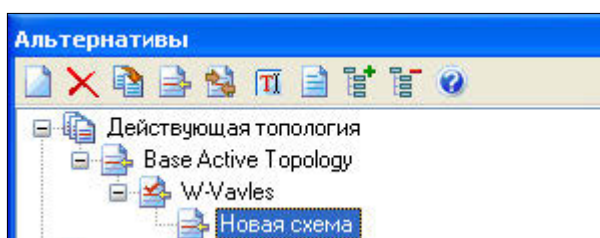


Рис. 11.16. Альтернатива топологии

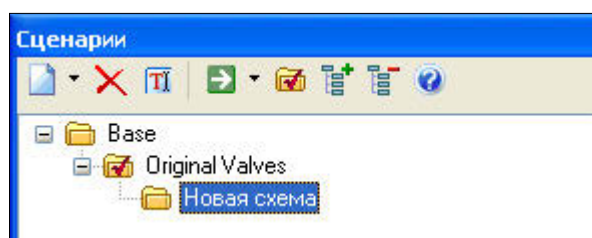


Рис. 11.17. Новый сценарий

Откройте окно свойств вновь созданного сценария и задайте альтернативную топологию (рис. 11.18). Закройте окно свойств сценария и объявите его текущим.

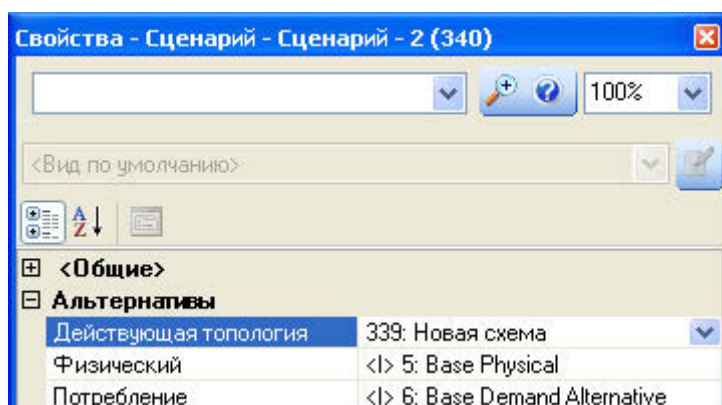


Рис. 11.18. Свойства сценария «Новая схема»

Используя инструменты поиска элементов найдите на схеме узел J-44 и соедините его трубой с узлом J-45. С помощью меню **Инструменты – Компоновка** активизируйте инструмент *Запорный клапан*. Установите два таких клапана на вновь созданной трубе (рис. 11.19). Убедитесь, что оба клапана ассоциированы именно с данной трубой.

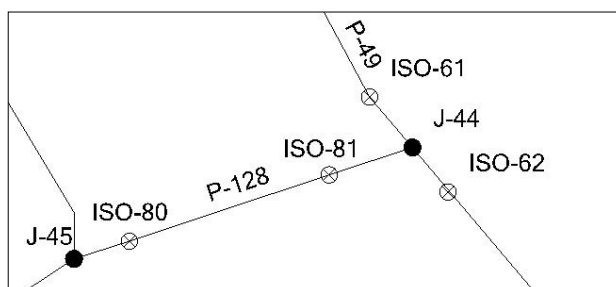


Рис. 11.19. Новый трубопровод

Вновь запустите приложение *Критичность*. В его окне нажмите кнопку *Создать*. В окне *Добавить сценарий* поставьте отметку около сценария *Новая схема* (рис. 11.20).

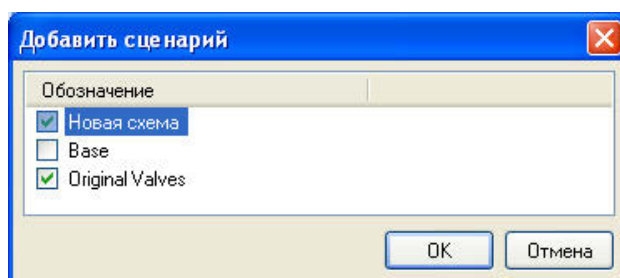


Рис. 11.20. Добавление сценария

После нажатия кнопки *OK* установите курсор на строку *Новая схема* левой панели. На правой вкладке *Диапазон сегментации* укажите, что будет анализироваться вся сеть. Запустите расчет. Для просмотра его результатов перейдите на вкладку *Результаты сегментации* (рис. 11.21).

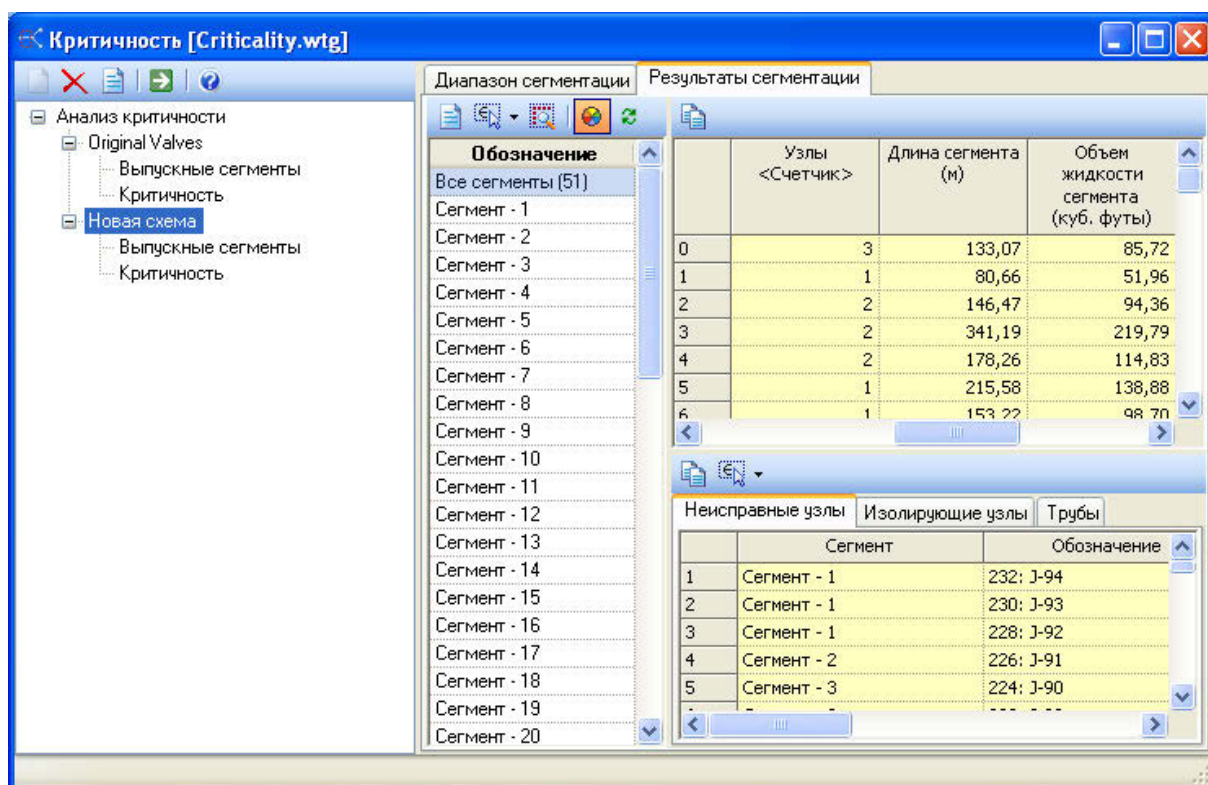
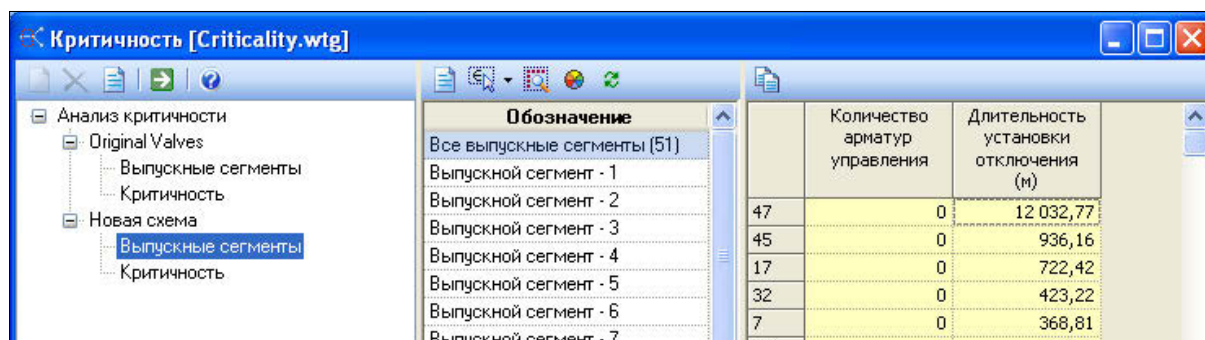


Рис. 11.21. Сегменты «Новой схемы»

Далее выполните расчет выпускных сегментов для новой схемы.



Результаты расчетов отсортируйте по уменьшению значений в колонке *Длительность установки отключения* (рис. 11.22).



Обозначение	Количество арматур управления	Длительность установки отключения (н)
Все выпускные сегменты (51)		
Выпускной сегмент - 1		
Выпускной сегмент - 2		
Выпускной сегмент - 3	47	0
Выпускной сегмент - 4	45	0
Выпускной сегмент - 5	17	0
Выпускной сегмент - 6	32	0
Выпускной сегмент - 7	7	0

Рис. 11.22. Выпускные сегменты «Новой схемы»

Как видно, длина наибольшего сегмента практически не изменилась, но длины следующих сегментов существенно уменьшились. На рис. 11.23 показан второй по протяженности сегмент № 46.

Длину выпускных сегментов можно уменьшить, конечно, и путем установки дополнительных изолирующих задвижек.

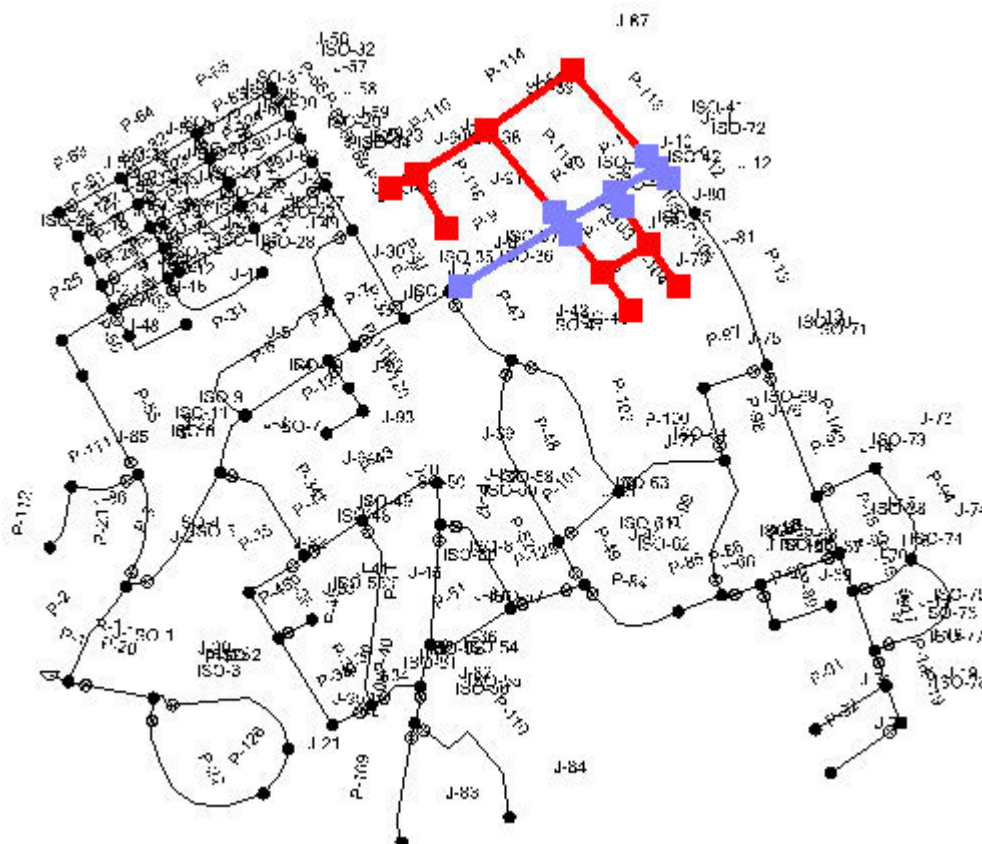


Рис. 11.23. Сегмент № 46

## 12. Моделирование переходных процессов в простом трубопроводе

В данном и последующих разделах мы познакомимся с еще одним продуктом фирмы Bentley – программой Hammer («молоток») для моделирования нестационарных (переходных) процессов в сетях водоснабжения.

Ее основная задача – расчет гидравлических ударов и поиск технических решений для их предотвращения или хотя бы смягчения их негативных последствий.

К сожалению, в данное время русской версии этой программы нет. Однако наша задача существенно облегчается тем, что интерфейсы Hammer и WaterGEMS полностью совпадают. Кроме того, сами проекты WaterGEMS могут быть прочитаны и проанализированы в среде Hammer.

В этом разделе будет рассмотрено численное моделирование гидравлических переходных процессов, возникающих в простом трубопроводе при внезапной остановке питающего насоса и при перекрытии клапана, установленного в конце трубопровода

Схема, которая будет исследоваться, показана на рис. 12.1. Насос РМР-1 перекачивает воду из водоема R-1 (уровень воды 383 м) в резервуар R-2 (уровень воды 456 м). При установившемся режиме расход составляет 453 л/с. Насос установлен на высоте 363 м. Частота вращения рабочего колеса  $1760 \text{ мин}^{-1}$ . Другие параметры, необходимые для выполнения расчетов, будут рассмотрены ниже.

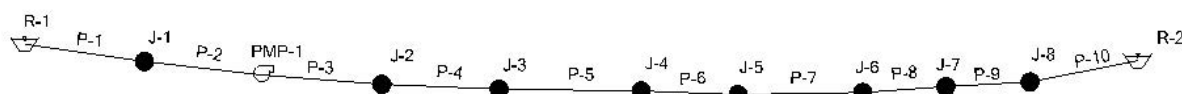



Рис. 12.1. Расчетная схема

### 12.1. Создание расчетной модели в среде Hammer

Запустите программу Hammer. Нажмите кнопку  – New для создания нового проекта. С этой же целью можно воспользоваться пунктом меню **File – New**. Рекомендуем вам сразу сохранить проект в своей папке.

Перед построением модели целесообразно оценить исходные данные. Если среди них имеются однотипные элементы, то для каждого из них можно создать прототип. Это позволит вам уменьшить объем вводимых данных и ускорить работу.

В данном случае все участки трубопровода имеют одинаковый диаметр, изготовлены из одного материала и имеют соответствующий ему коэффициент шероховатости  $C$  (коэффициент Хазена – Вильямса) и т. д. Таким образом, в этой ситуации имеет смысл использовать соответствующий *прототип*.

Для создания прототипа воспользуйтесь пунктом меню **View – Prototypes** (рис. 12.2).

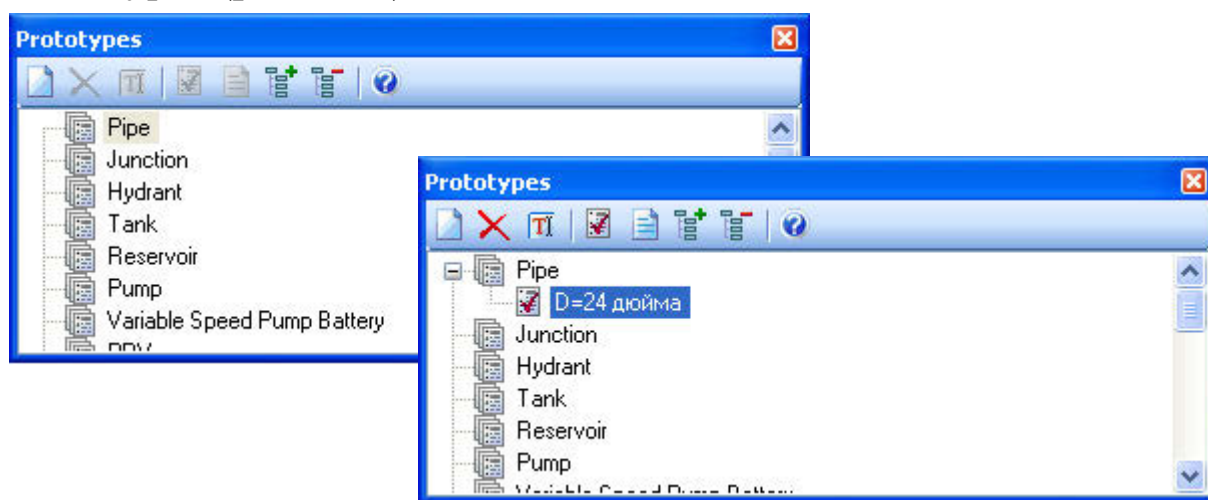




Рис. 12.2. Создание прототипа

Выделите щелчком пункт *Pipe* (труба), нажмите кнопку  – *New*.

Новому прототипу будет автоматически присвоено имя *Prototype-1*. Щелчком правой клавиши мыши можно вызвать контекстное меню и с помощью пункта *Rename* переименовать его. С этой же целью можно нажать кнопку .

Двойным щелчком откройте окно свойств данного прототипа. Задайте следующие физические параметры:

Диаметр.....	24 дюйма
Материал.....	Ductile Iron (чугун)
Коэффициент Хазена – Вильямса $C$ ...	130
Has User Defined L.....	True (Правильно)
(Имеет длину, определяемую пользователем)	

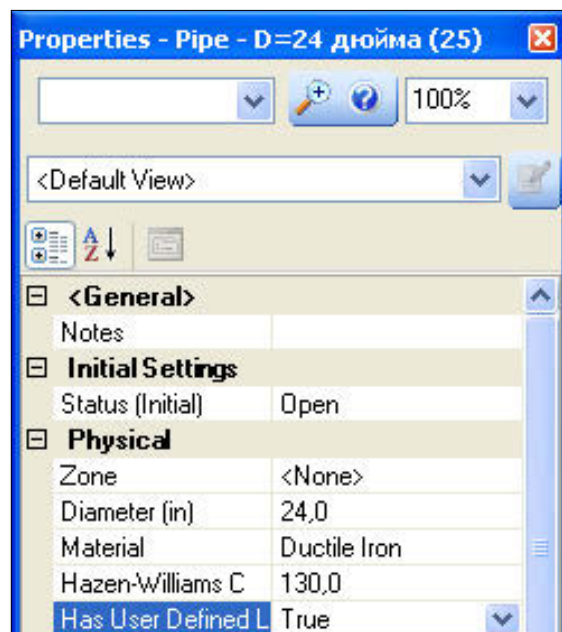


Рис. 12.3. Свойства прототипа  $D = 24$  дюйма

Теперь можно приступить к построению схемы трубопровода, показанного на рис. 12.1. Полагаем, что вы уже имеете достаточно опыта, чтобы выполнить эту работу самостоятельно.

Высотные отметки узлов введите с помощью таблицы *Junction* (узел) в соответствии с табл. 12.1.

С помощью таблицы *Pipe* (труба) в соответствии с табл. 12.2 введите длины труб, определяемые пользователем.

Таблица 12.1

Высотные отметки  
(elevation) узлов

Метка узла	Elevation, м
J-1	363
J-2	363
J-3	408
J-4	395
J-5	395
J-6	386
J-7	380
J-8	429

Таблица 12.2

Длины труб, определяемые  
пользователем

Метка трубы	Length (User Defined), м
P-1	50
P-2	40
P-3	10
P-4	20
P-5	380
P-6	300
P-7	250
P-8	400
P-9	250
P-10	175

Обратите внимание, что диаметр, материал и коэффициент Ха-зена – Вильямса уже имеют значения, указанные при определении прототипа.

Для выполнения обычного гидравлического расчета разбиение трубопровода на отдельные участки не требуется. В случае расчета распространения волны давления высота расположения тех или иных сечений трубопровода должна учитываться. Именно поэтому в данном случае трубопровод представлен в виде отдельных отрезков.

Двойными щелчками последовательно откройте окна свойств резервуаров и введите значения высот (м) *Elevation* (уровень воды) и *Elevation (Inlet/Outlet Invert)* (высота входного / выходного отверстия): для R-1 – 383 и 377 м; для R-2 – 456 и 450 м.

Для выполнения обычного гидравлического расчета ввод высоты расположения входного (выходного) отверстия не требуется. В случае расчета распространения волны давления, возникающей при гидравлическом ударе, эта высота должна учитываться.

Двойным щелчком по изображению насоса откройте окно его свойств и введите высоту расположения *Elevation* – 363 м (рис. 12.4).

В разделе *Physical* (физические параметры) окна свойств установите курсор на поле *Pump Definition* (определение насоса) и в выпадающем меню выберите пункт *Edit Pump Definition* (редактирование определения насоса).

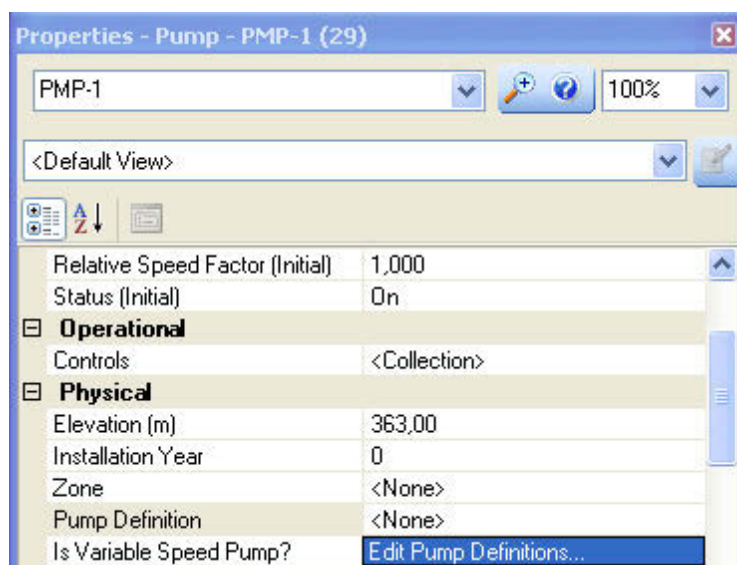



Рис. 12.4. Свойства насоса



Это приведет к открытию окна свойств насоса (Pump Definition). В нем нажмите кнопку  – *New* (Новый). При желании можете изменить наименование насоса.

Поскольку мы рассматриваем учебный пример, вводить точную расходно-напорную характеристику насоса нет необходимости. Мы воспользуемся возможностью программы Hammer задавать характеристику насоса по умолчанию. Для этого достаточно ввести только одну точку, соответствующую номинальному режиму (рис. 12.5):

Flow (подача)... 467 л/с

Head (напор).... 267 м

Предварительно в поле *Pump Definition Type* необходимо указать *Design Point (1 Point)*.

Перейдите на вкладку *Efficiency* (Эффективность) и введите постоянное значение КПД насоса: 85 % (рис. 12.6).

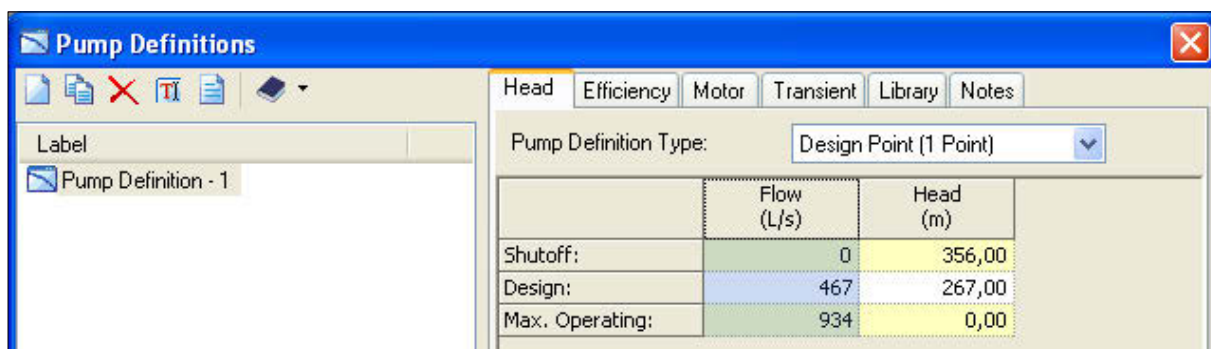


Рис. 12.5. Характеристика насоса

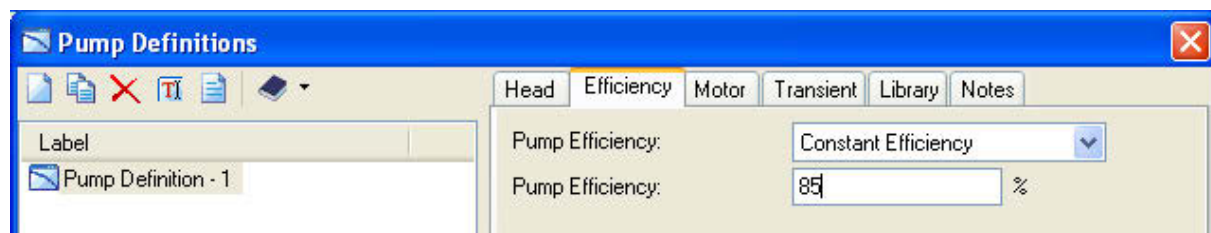



Рис. 12.6. КПД насоса

Перейдите на вкладку *Transient* (переходный процесс) и задайте значение момента инерции вращающихся частей насоса и двигателя: *Inertia*: 169 Н·м<sup>2</sup> (рис. 12.7).

Значение этого параметра можно узнать у производителя или оценить по мощности насоса. В последнем случае используется специальный калькулятор, который вызывается кнопкой .



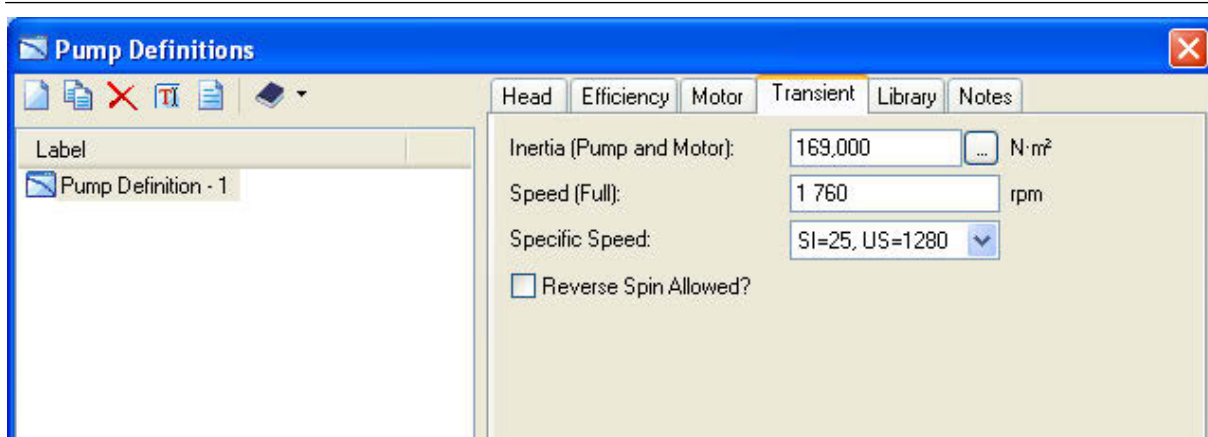


Рис. 12.7. Параметры насоса для расчета переходного процесса

На этой же вкладке задаются:

- Speed (скорость вращения): 1760,0 rpm (об/мин);
- Specific Speed – SI 25, USA 1280 – параметр, использующийся в программе Hammer при расчете взаимодействия ударной волны и рабочего колеса насоса (в отечественной практике его аналогом является коэффициент быстроходности насоса);
- Reverse Spin Allowed? (изменение направления вращения разрешено?): запрещено (снимите флажок). В нашем случае этот запрет обусловлен наличием у насоса обратного клапана.

Вновь откройте окно свойств насоса и укажите в поле *Pump Definition* введенный набор параметров насоса (рис. 12.8).

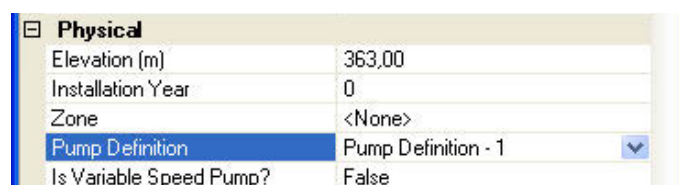


Рис. 12.8. Свойства насоса

Закройте окно свойств насоса и сохраните проект.

Далее нужно рассчитать скорость распространения волны давления. Для выполнения данного расчета предназначен специальный калькулятор, входящий в состав Hammer. Для его запуска воспользуйтесь пунктом меню **Tools – Wave Speed Calculator**.


Для расчета этой скорости необходимо ввести следующие параметры (рис. 12.9):

- относящиеся к жидкости (Liquid):  
модуль объемной упругости (Bulk Modulus of Elasticity);

- 
- относительную плотность (Specific Gravity);
- относящиеся к материалу стенок трубопроводов (Material):
    - модуль упругости Юнга (Young's Modulus);
    - коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio).
- Дополнительно в этом же окне указываются:
- толщина стенки трубы (Wall Thickness);
  - способ крепления трубы (Pipeline Support).

The image shows a software dialog box titled "Wave Speed Calculator". It contains several input fields and a dropdown menu. The "Liquid" section has "Bulk Modulus of Elasticity" set to 0,0 MPa and "Specific Gravity" set to 0. The "Material" section has "Young's Modulus" set to 0,0 MPa and "Poisson's Ratio" set to 0. The "Miscellaneous" section has "Wall Thickness" set to 0,0 mm and "Pipeline Support" set to "Anchored Throughout". The "Features" section has "All" selected. At the bottom are "OK", "Cancel", and "Help" buttons.

Рис. 12.9. Калькулятор скорости волны давления

Для ввода этих параметров можно воспользоваться библиотеками свойств жидкостей и материалов. Для открытия соответствующих библиотек нажмите кнопку . В нашем случае: жидкость – вода при температуре 4 °С, материал – Ductile Iron (рис. 12.10). Толщина стенки трубы 18 мм.

Способ крепления (pipeline support) по умолчанию.

Нажмите кнопку ОК. Программа рассчитает скорость распространения волны во всех отрезках трубопровода.

Значения скоростей вы можете увидеть в окне свойств конкретной трубы. Например, в трубе Р-8 она равняется 1251,5 м/с (рис. 12.11).

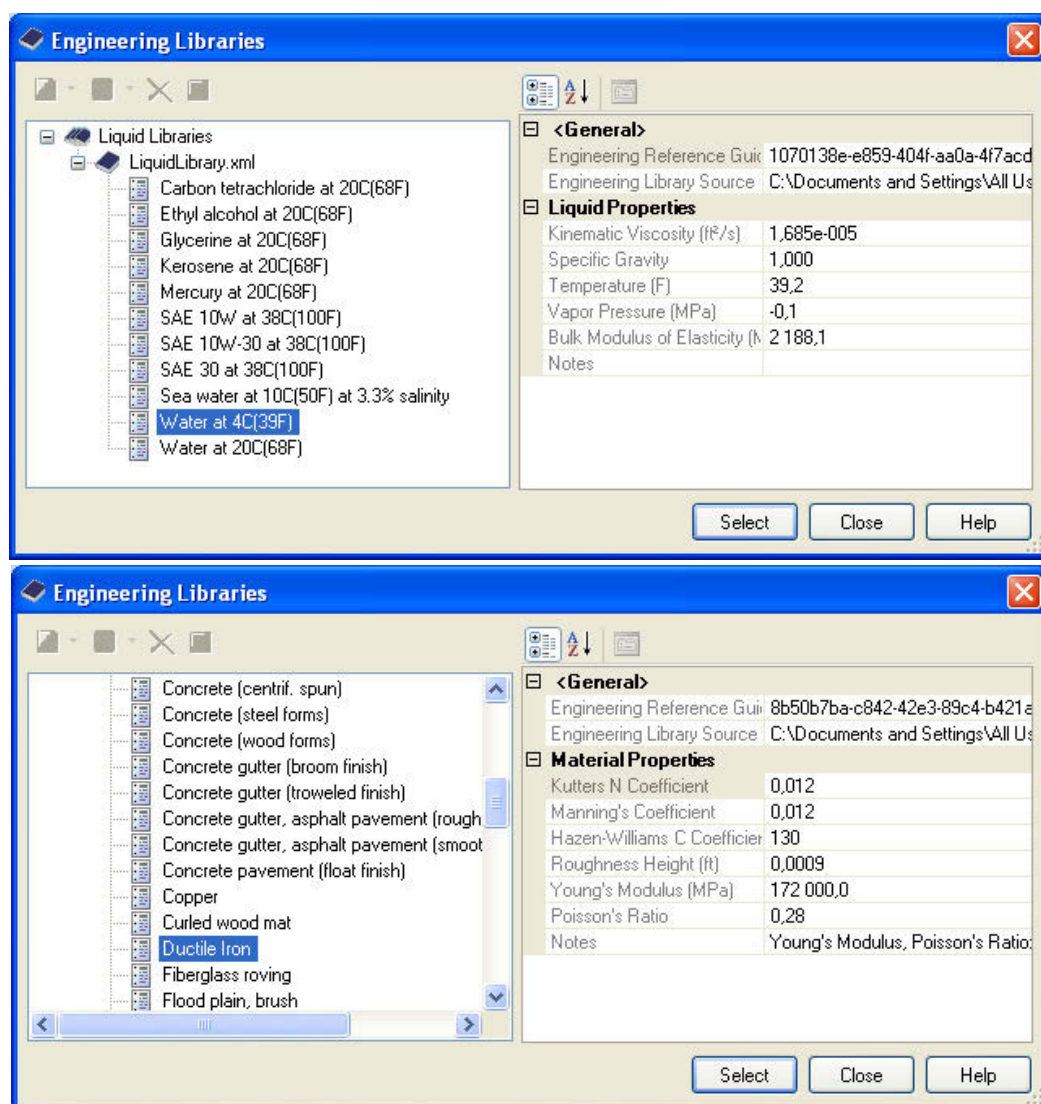



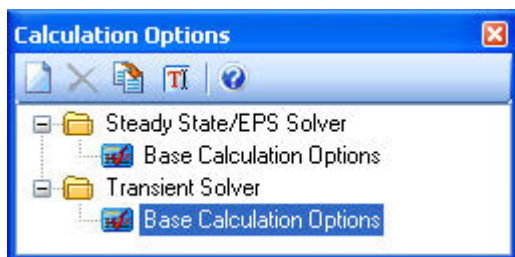
Рис. 12.10. Технические библиотеки жидкостей и материалов труб

<b>Physical</b>	
Zone	<None>
Diameter (in)	24.0
Material	Ductile Iron
Hazen-Williams C	130.0
Has User Defined Length	True
Length (User Defined)	400.00
Has Check Valve?	False
Specify Local Minor Loss	True
Minor Loss Coefficient	0.000
Installation Year	0
<b>Transient (Physical)</b>	
Wave Speed (m/s)	1 251.49

Рис. 12.11. Свойства трубы P-8  
(фрагмент)

## 12.2. Ввод параметров расчета

Перед началом расчетов необходимо выполнить предварительные настройки. Откройте окно параметров расчетов. Для этого нажмите кнопку  или воспользуйтесь пунктом меню **Analysis – Calculation Options**.



Двойным щелчком откройте окно базовых свойств расчета гидравлического удара *Transient Solver – Base Calculation Options* (рис. 12.12).

Рис. 12.12. Окно опций расчета

В разделе Summary (аннотация) установите следующие параметры (рис. 12.13):

- Run Duration Type (тип расчетов): *Time* (время);
- Run Duration (расчетный период): 140 сек;
- Pressure Wave Speed (скорость распространения волны давления): 0 м/с (по умолчанию);

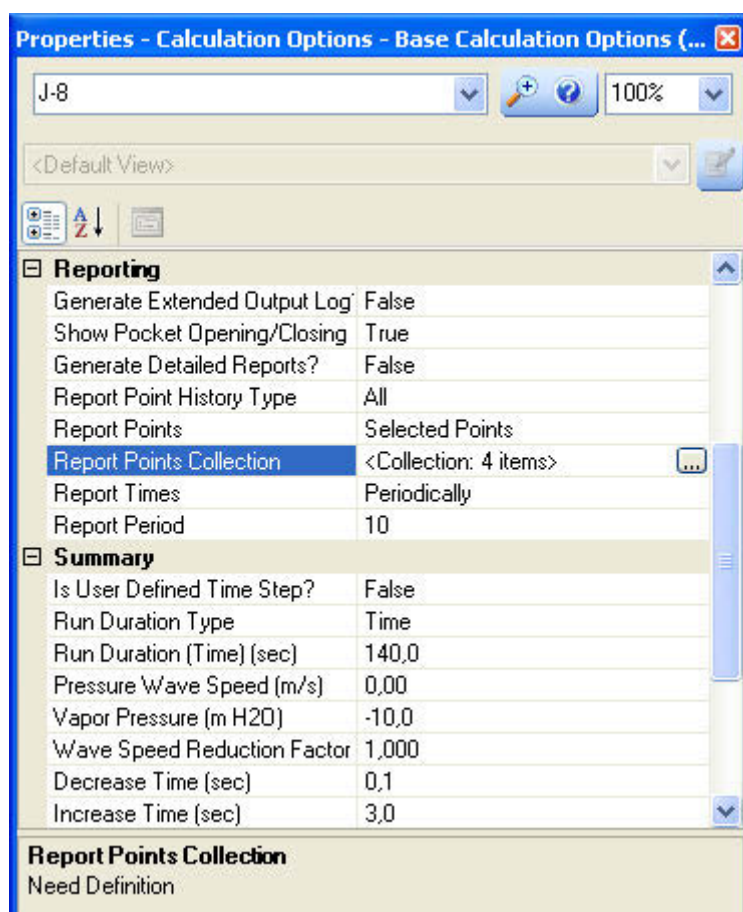




Рис. 12.13. Свойства расчета

- Vapor Pressure (давление насыщенных паров, избыточное):  
- 10 м вод. ст. (по умолчанию);
- Generate Animation Data (создание анимации): *False* (нет);
- Run Extended CAV (рассчитать процесс кавитации): *True* (да).

В разделе *Report* (отчет) установите следующие параметры:

- Show Pocket Open/Closing (выводить в отчет время образования / схлапывания кавитационных пузырьков): *True* (да);
- Report Point (включить в отчет избранные точки): *Selected Point* (избранные точки).

Для указания точек, в которых далее можно будет построить графики изменения параметров во времени, в поле *Report Point Collection* (избранные точки) нажмите кнопку  и с помощью кнопки  переместите указанные ниже точки с левой панели на правую (рис. 12.14):

P-3:... PMP-1

P-4:... J-3

P-5... J-3

P-10:... R-2

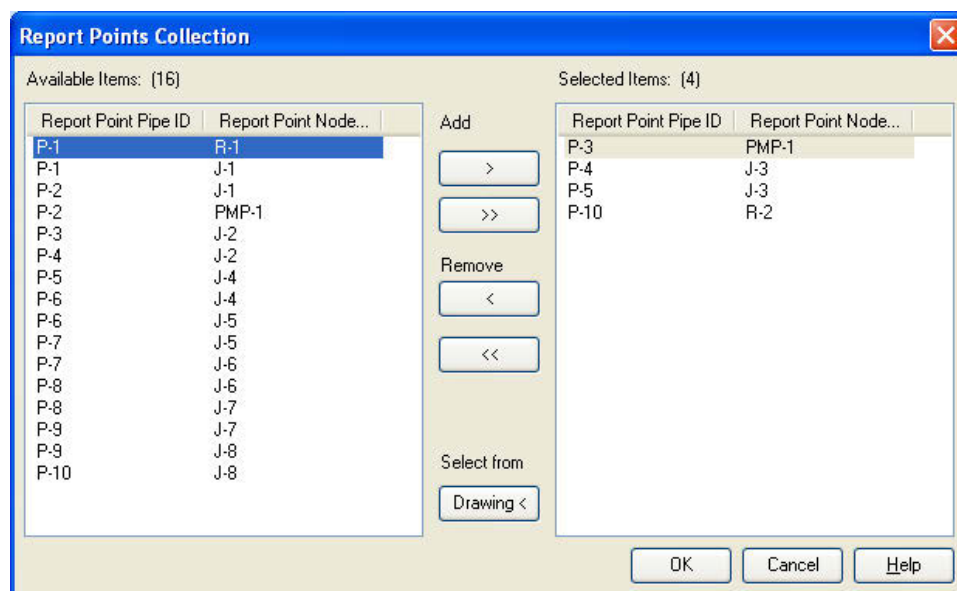





Рис. 12.14. Избранные точки

Для отображения результатов расчетов в виде графиков изменения параметров по длине трубопроводов их необходимо указать программе, т. е. задать так называемый профиль (Profile).



Нажмите кнопку  – *Profiles* (профили) В окне *Profiles* нажмите кнопку  – *New* (новый) для создания нового профиля.

В открывшемся окне *Profile Setup* (настройка профиля) нажмите кнопку *Select From Drawing* (выбрать на рисунке). На схеме сети последовательными щелчками левой клавиши мыши выделите все трубы от насоса до резервуара R-2. Завершите ввод кнопкой  – *Готово*. Результат отобразится в окне *Profile Setup* в виде перечня узлов и труб (рис. 12.15).

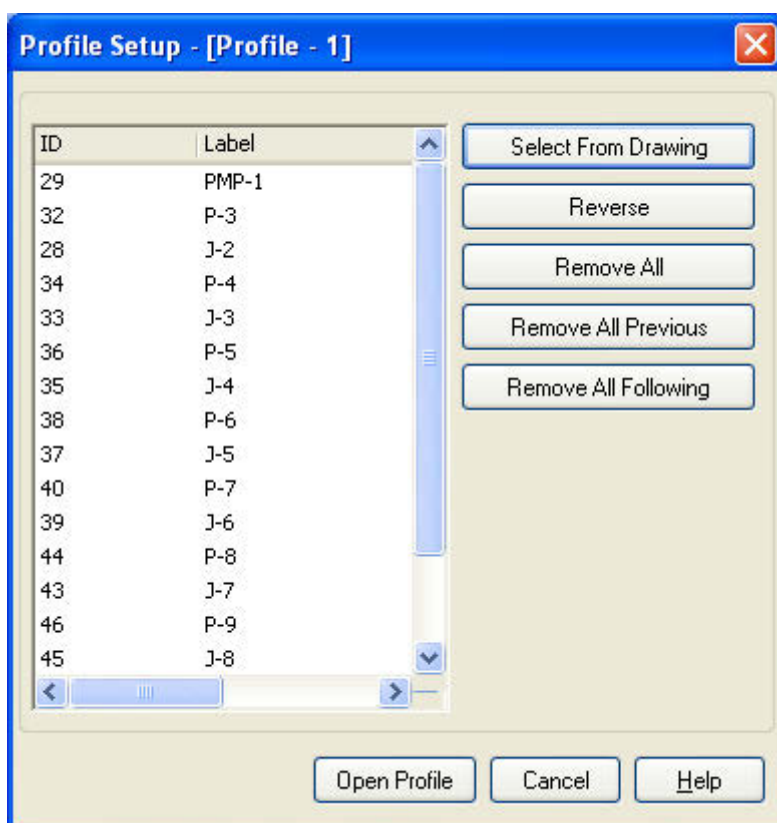


Рис. 12.15. Профиль для построения графика

Нажмите кнопку *Open Profile* (открыть профиль) для просмотра графика. Убедитесь, что высотные отметки узлов введены верно.

Щелчком правой клавиши мыши по наименованию профиля откройте контекстное меню и убедитесь, что отмечен пункт *Transient Report Path*, т. е. расчет изменения параметров потока при гидравлическом ударе будет выполняться именно для указанных трубопроводов (рис. 12.16).

Закройте окно *Profiles* и сохраните проект.



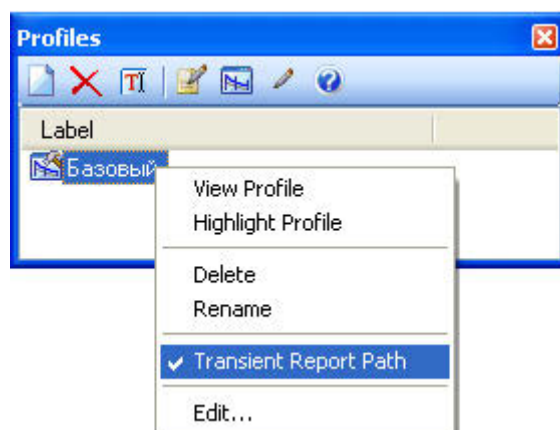


Рис. 12.16. Окно Profiles

### 12.3. Расчет гидравлического удара

В данной части работы будет выполнен расчет гидравлического удара, возникающего при внезапном прекращении электропитания насоса, снабженного обратным клапаном.

Дважды щелкните по изображению насоса (PMP-1) для открытия окна его свойств. В разделе управления переходным процессом *Transient (Operation)* в поле *Pump Type (Transient)* задайте тип нестационарности.

Hammer позволяет выбрать один из следующих вариантов нестационарности:

- остановка насоса,
- запуск насоса,
- изменение скорости (крутящего момента),
- постоянная скорость.

Последний вариант выбирают, если нестационарность обусловлена внешними по отношению к насосу причинами, например открытием (закрытием) какой-либо задвижки и т. п.

В данном случае выберите тип *Shut Down After Time Delay* – остановка через заданный промежуток времени (рис. 12.17).

При этом потребуется задать несколько дополнительных параметров:

- Diameter (Pump Valve) (диаметр обратного клапана): 24 дюйма;
- Time Delay until Shut Down (время до момента отключения питания): 5 с;

---

– Pump Valve Type (тип используемого клапана) – *Check Valve* (обратный клапан).

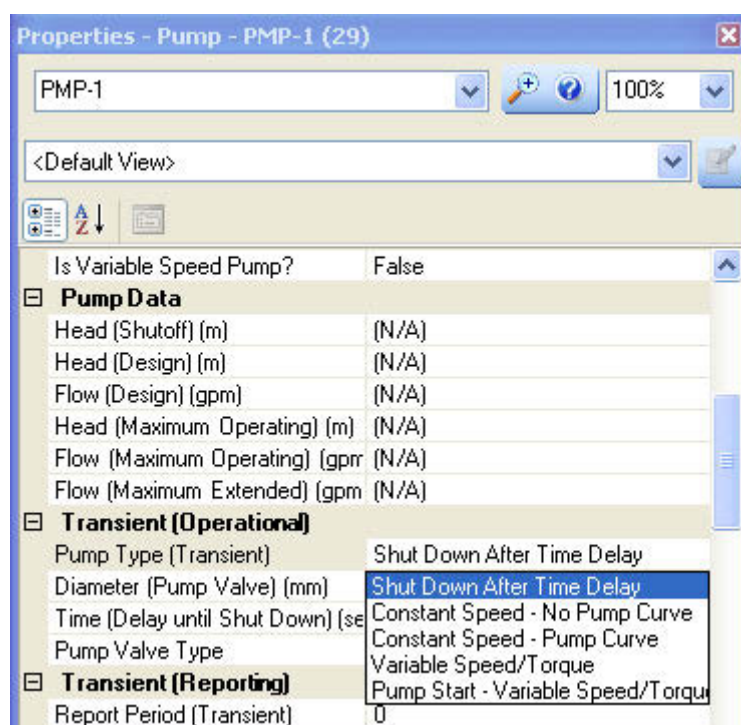




Рис. 12.17. Выбор типа нестационарности

Предполагается, что отключение питания насоса и закрытие обратного клапана происходят мгновенно.

Нажмите кнопку  для выполнения предварительного расчета течения воды в установившемся режиме. Если вы следовали нашим указаниям, то после завершения расчета график изменения напора по заданному ранее профилю должен соответствовать показанному на рис. 12.18.

Теперь выполните расчет переходного процесса. Для этого нажмите кнопку . Ход расчета будет отображаться на информационном табло (рис. 12.19).

После завершения расчета на экране появится окно его итогов (рис. 12.20). Уделите некоторое время знакомству с содержимым его вкладок. Для дальнейшей работы это окно вам не понадобится, поэтому его нужно закрыть.

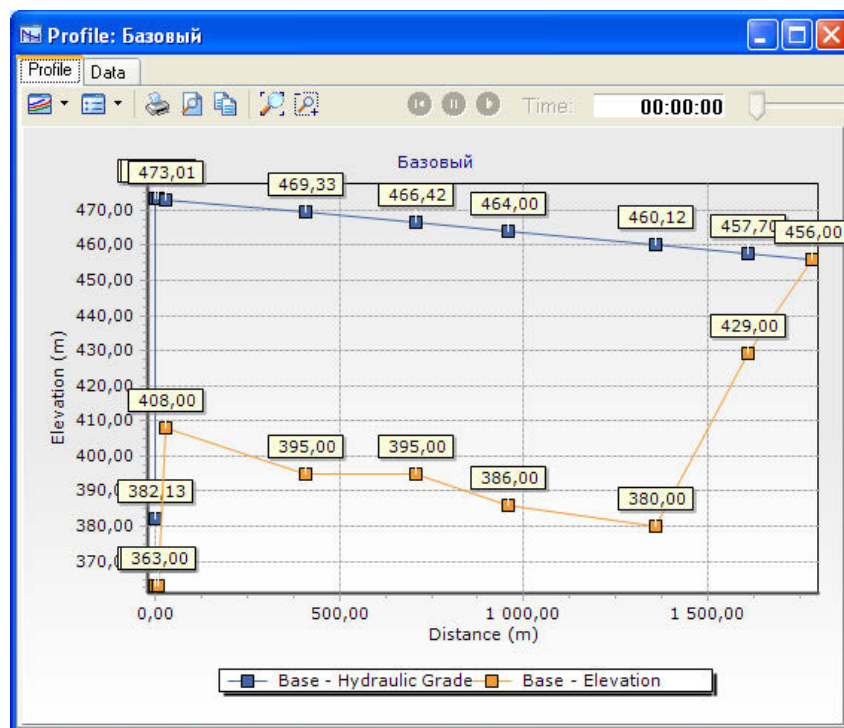


Рис. 12.18. Изменение высоты узлов и напора при стационарном течении



Рис. 12.19. Окно хода расчета нестационарного течения

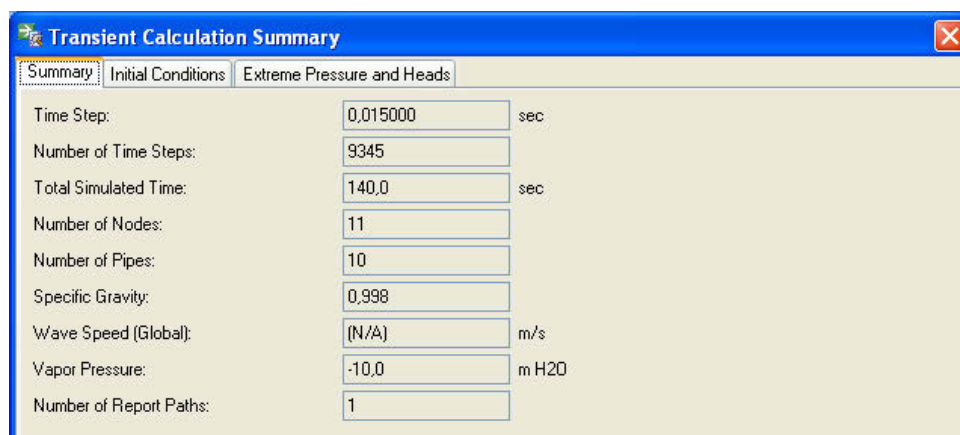


Рис. 12.20. Итоги расчета нестационарного течения

---

## 12.4. Представление результатов в графическом виде и их анализ

Результаты расчетов удобнее анализировать, если они представлены в виде графиков.


Для просмотра результатов расчета в графическом виде, в том числе и в режиме анимации, предназначен инструмент *Transient Results Viewer*. Запустите его с помощью кнопки  или воспользуйтесь соответствующим пунктом меню **Analysis**. После запуска вам нужно будет указать версию (старую или новую) *Transient Results Viewer* (рис. 12.21).



Рис. 12.21. Выбор версии программы просмотра

Далее будет рассмотрена новая версия, поэтому нужно нажать кнопку *Yes* (да).

В следующем окне необходимо указать имя профиля, для которого будут построены графики и их тип (рис. 12.22).

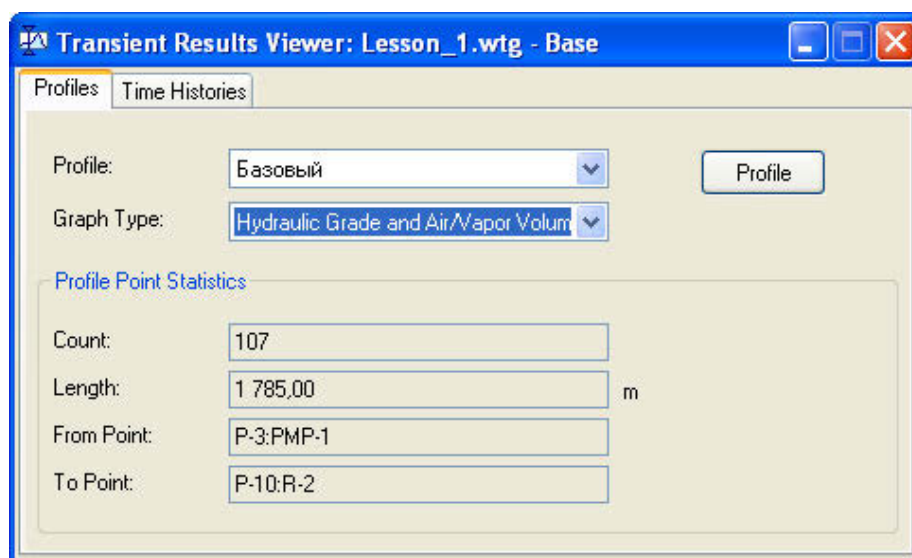


Рис. 12.22. Выбор профиля

---

Кроме того выводится справочная информация: количество точек, по которым строится график (Count), длина трубы (Length), начальная (From Point) и конечная (To Point) точки.

Типы графиков, которые могут быть построены, ограничены следующим перечнем (рис. 12.23):

- Hydraulic Grade and Air/Vapor Volume – гидростатический напор и объем воздушной / паровой фазы;
- Pressure and Air/Vapor Volume – давление и объем воздушной / паровой фазы;
- Hydraulic Grade – гидростатический напор;
- Pressure – давление;
- Velocity – скорость;
- Air/Vapor Volume – объем воздушной / паровой фазы.

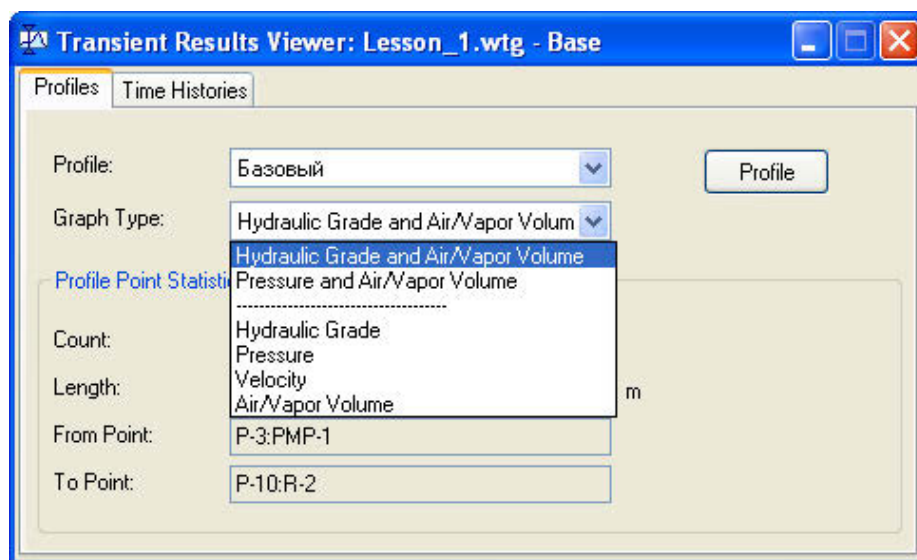


Рис. 12.23. Выбор графика

В первых двух случаях будут построены два графика одновременно. На рис. 12.24 показаны графики первого типа. Для их построения нужно нажать кнопку *Profile*.

Верхний график показывает рассчитанное программой максимальное значение объема воздушной / паровой фазы в каждом сечении трубы в течение заданного ранее расчетного периода (140 с). На нижнем графике вы увидите несколько линий:

- зеленая – высотные отметки узловых точек;
- черная – изменение напора в установившемся режиме;



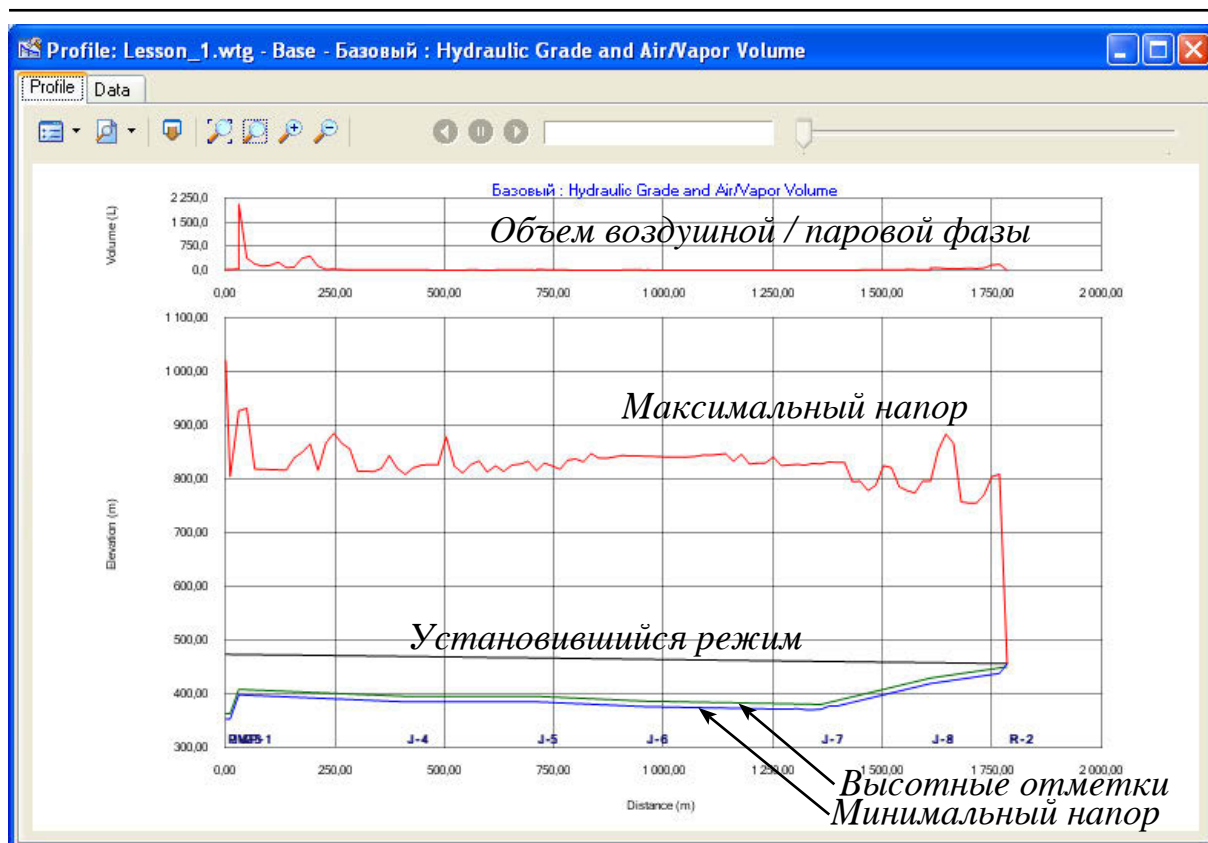


Рис. 12.24. Изменение параметров потока по выбранному профилю

- красная – максимальный напор в течение расчетного периода;
- синяя – минимальный напор в течение расчетного периода.

Размерности параметров можно изменить на вкладке *Data*, где те же данные представлены в табличном виде (рис. 12.25).

Данные графики не позволяют проследить изменение параметров во времени (кнопки управления анимацией заблокированы). Далее мы рассмотрим расчет анимации, но следует иметь в виду, что полученные в этом случае данные могут иметь весьма большой объем.

Profile: Lesson_1.wtg - Base - Базовый : Hydraulic Grade and Air/Vapor Volume							
Profile		Data					
	Point	Distance (m)	Elevation (m)	Minimum Hydraulic Grade (m)	Maximum Hydraulic Grade (m)	Initial Hydraulic Grade (m)	Maximum Air/Vapor Volume (L)
1	P-3:PMP-1	0,00	362,99	352,71	1 020,99	473,29	25,0
2	P-3:J-2	9,90	362,99	352,71	804,61	473,20	23,9
3	P-4:J-2	10,20	362,99	352,71	804,61	473,20	24,8
4	P-4:J-3	29,80	408,01	397,73	926,96	473,02	35,8

Рис. 12.25. Результаты расчета в виде таблицы



Тем не менее, и в данном случае графики изменения параметров потока во времени в некоторых (избранных) точках можно построить. Закройте окно графиков и перейдите на вкладку *Time Histories* окна *Transient Results Viewer*.

В поле *Time History* в виде меню представлен перечень избранных точек, который вы определили ранее среди прочих параметров расчета (рис. 12.26).

В поле *Graph Type* указываются типы графиков, которые могут быть построены.

На рис. 12.27 показаны графики изменения гидростатического напора, расхода и объема газовой фазы (*Hydraulic Grade, Flow and Air/Vapor Volume*) в узле J-3 со стороны трубы P-4.

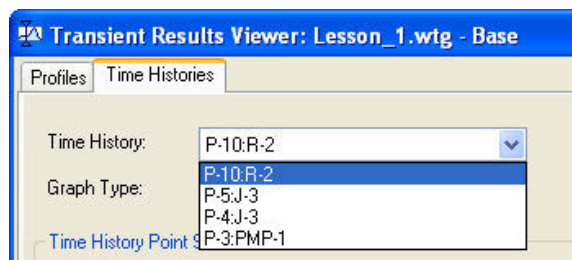


Рис. 12.26. Избранные точки

Обратите внимание, что стабилизация параметров потока происходит довольно медленно.

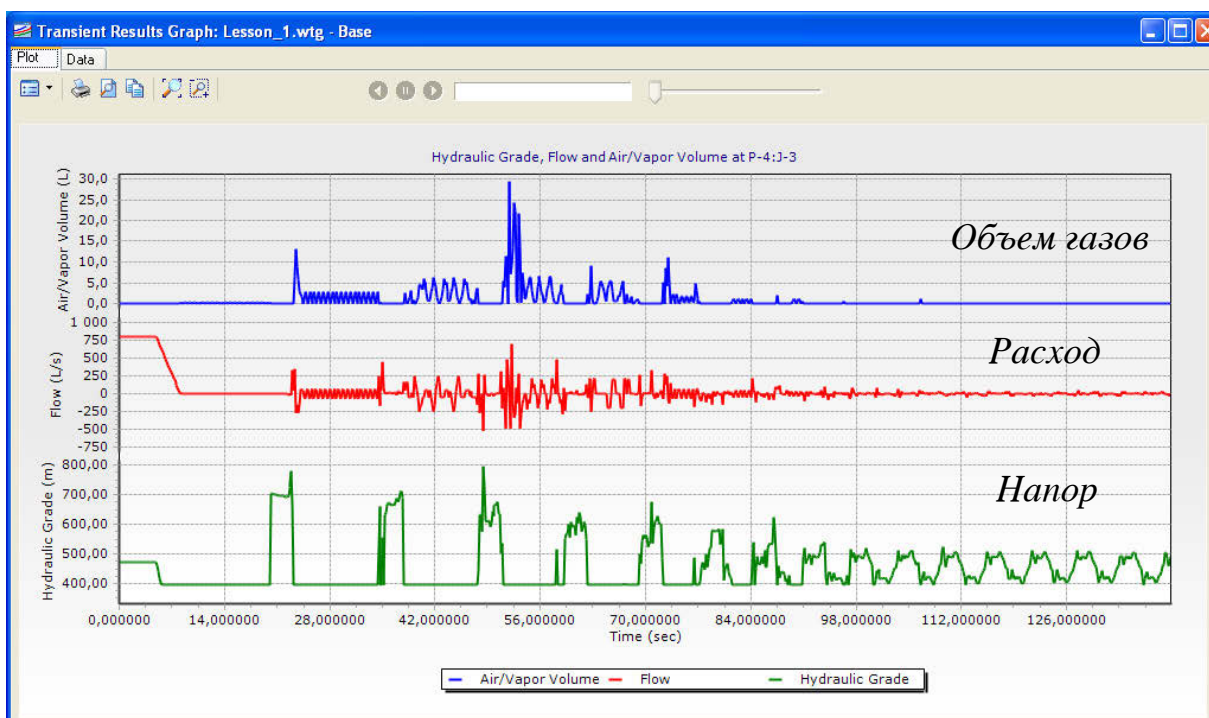


Рис. 12.27. Изменение параметров в выбранной точке во времени

---

Программа предоставляет возможность проследить за изменением параметров потока во времени в режиме анимации.

Для выполнения этого типа расчета необходимо отметить соответствующий пункт в окне параметров.

Откройте окно *Calculation Options*, как было указано ранее (рис. 12.28). В поле *Generate Animation Data* задайте значение *True* (да).

Далее вновь выполните расчет. После его завершения запустите *Transient Results Viewer* и постройте график по профилю. Обратите внимание, что теперь кнопки управления анимацией доступны. Запустите анимацию и проследите за изменением параметров во времени. Перед началом следующей части работы сохраните проект.

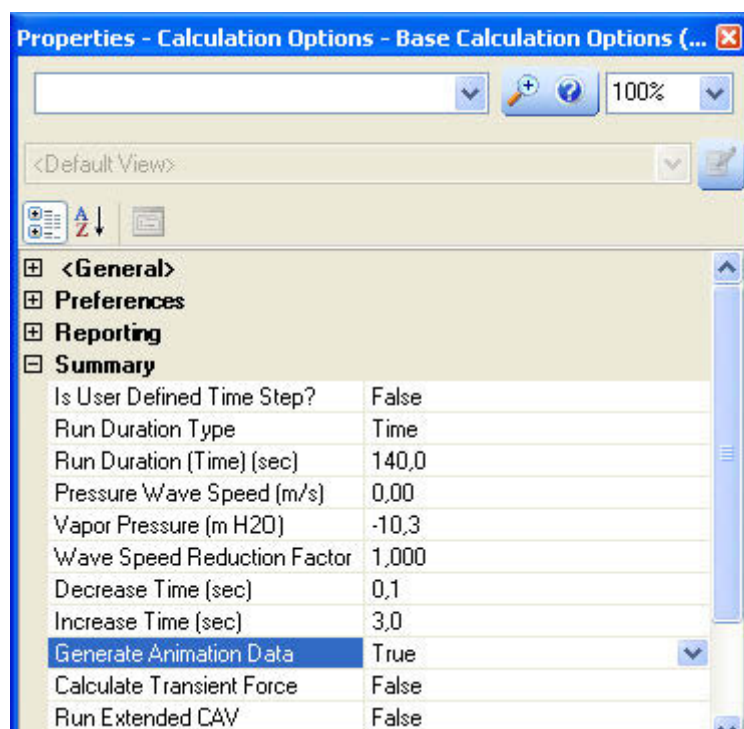


Рис. 12.28. Свойства расчета

## 12.5. Влияние времени закрытия клапана на силу гидравлического удара

В этой части работы будет рассмотрен «классический» гидравлический удар, возникающий при закрытии клапана (задвижки), установленного в конце простого трубопровода (рис. 12.29).

Сначала измените схему. В окрестности узла J-8 установите клапан типа *VLA* – *Valve With Linear Area Change* (клапан с линейным изменением площади).

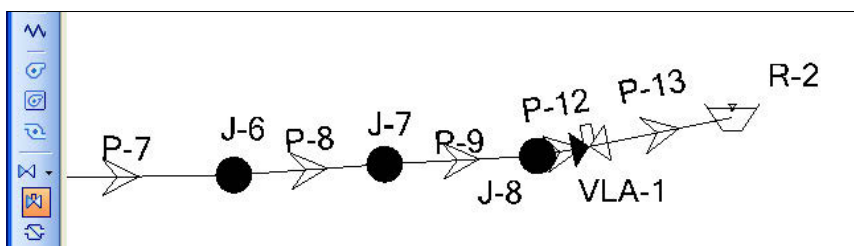


Рис. 12.29. Установка клапана

Двойным щелчком откройте окно свойств клапана (рис. 12.30).  
Задайте:

- высоту его расположения (Elevation) 429 м;
- диаметр 600 мм;
- Discharge Coefficient – коэффициент, характеризующий пропускную способность клапана,  $0,251 \text{ (м}^3/\text{с)}/(\text{м}^{0,5})$ ;
- время закрытия (Time to Close) 1 сек.

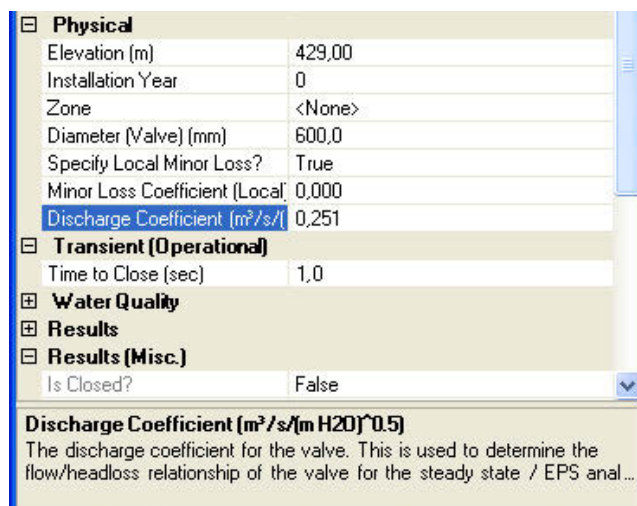




Рис. 12.30. Свойства клапана

Откройте окно базовых свойств расчета гидравлического удара (*Transient Solver*). Для указания точек, в которых далее можно

будет построить графики изменения параметров во времени, в поле *Report Point Collection* (Избранные точки) нажмите кнопку  и с помощью кнопки  переместите с левой панели на правую точки P-12 VLA-1 (рис. 12.31).

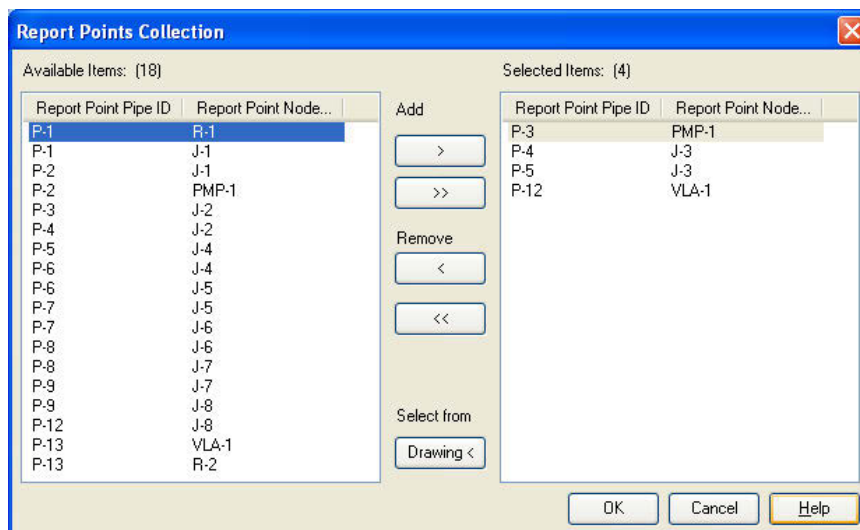


Рис. 12.31. Избранные точки

Измените некоторые параметры насоса. Укажите, что насос имеет постоянную скорость вращения (рис. 12.32).

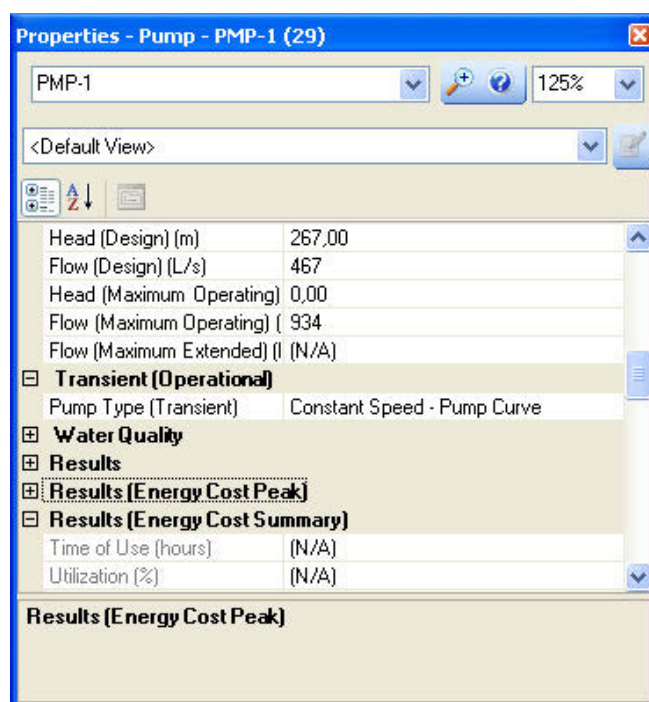


Рис. 12.32. Свойства насоса

С помощью пункта меню *Components – Pump Definition* откройте окно параметров насоса и на вкладке *Transient* укажите, что допускается изменение направления вращения.

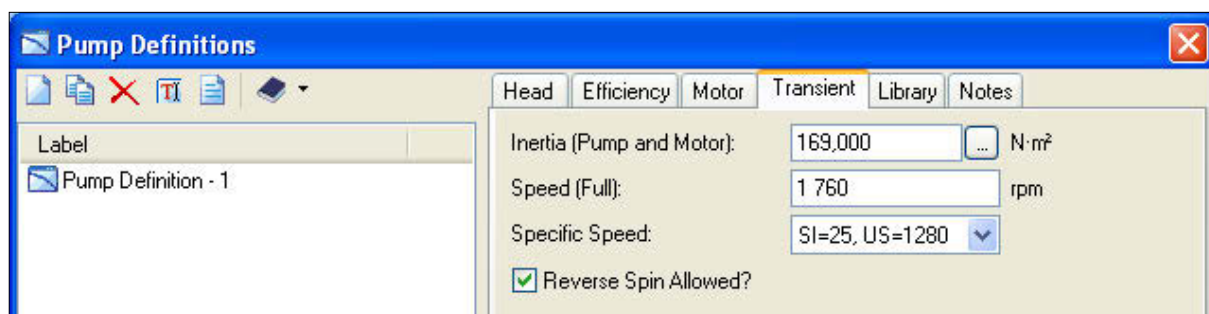


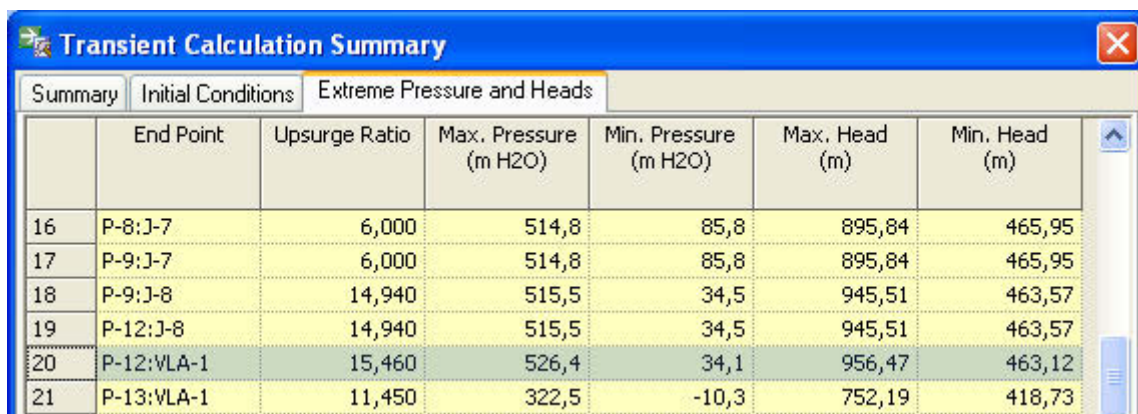


Рис. 12.33. Параметры насоса

Нажмите кнопку  для выполнения предварительного расчета течения воды в установившемся режиме, а после его завершения – кнопку  для выполнения расчета переходного процесса. После его завершения в окне общих итогов *Transient Calculation Summary* (рис. 12.34) перейдите на вкладку *Extreme Pressure and Head* (экстремальные значения давления и напора).



	End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (m H2O)	Min. Pressure (m H2O)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
16	P-8:J-7	6,000	514,8	85,8	895,84	465,95
17	P-9:J-7	6,000	514,8	85,8	895,84	465,95
18	P-9:J-8	14,940	515,5	34,5	945,51	463,57
19	P-12:J-8	14,940	515,5	34,5	945,51	463,57
20	P-12:VLA-1	15,460	526,4	34,1	956,47	463,12
21	P-13:VLA-1	11,450	322,5	-10,3	752,19	418,73

Рис. 12.34. Результаты расчета в виде таблицы

Запишите максимальное давление у клапана (со стороны трубы P-12). Аналогичным образом выполните расчеты для времени закрытия клапана 5 и 10 с. Максимальное давление у клапана с ростом времени его закрытия должно уменьшаться.

Для дальнейшей работы нам потребуется та же схема трубопровода, но без клапана. Поэтому сохраните проект под другим именем.



---

## 13. Средства защиты от гидроудара

В этом разделе будут рассмотрены устройства, предназначенные для уменьшения силы гидравлических ударов: гидропневматический аккумулятор, предохранительные клапаны, расширительный бак.

### 13.1. Использование гидропневматического аккумулятора

Гидропневматические аккумуляторы применяются для накопления энергии жидкости и ее последующего возврата в систему за счет энергии сжатого газа. В качестве сжимаемой среды используется азот или воздух. В аккумуляторах относительно небольших объемов вода и газ разделены эластичной мембраной (рис. 13.1).

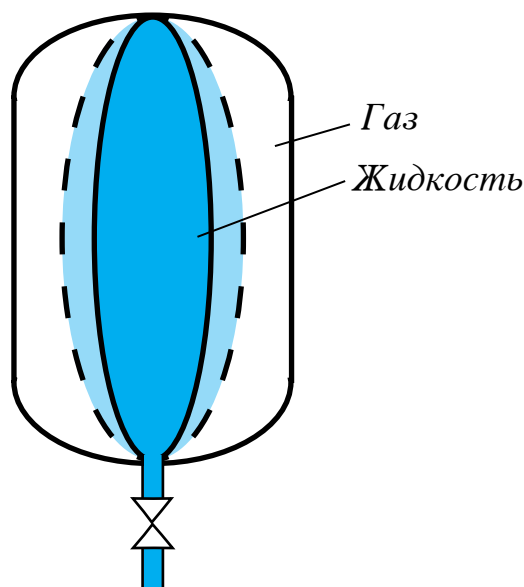


Рис. 13.1. Гидропневматический аккумулятор

Термодинамический процесс сжатия (расширения) газа в аккумуляторе описывается соотношением

$$p^a W_r^n = \text{const} ,$$

где  $p^a$  – абсолютное давление газа,  $W_r$  – его объем,  $n$  – показатель политропы. При резких колебаниях давления в сети  $n$  принимают равным 1,2–1,4.

Откройте ранее созданный проект (простой трубопровод без клапана; см. рис. 12.1). Для установки на нем гидропневматического аккумулятора необходимо создать альтернативную топологию сети.



Откройте менеджер альтернатив и создайте дочернюю альтернативу *Гидропневматический аккумулятор* (рис. 13.2).

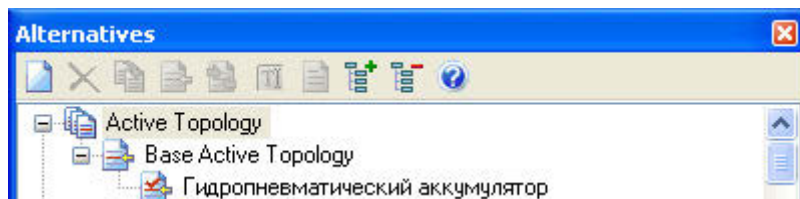


Рис. 13.2. Альтернативная топология

Откройте менеджер сценариев, переименуйте текущий сценарий, назвав его, например, *Без защиты*. Далее создайте дочерний сценарий *Гидропневматический аккумулятор* (рис. 13.3).

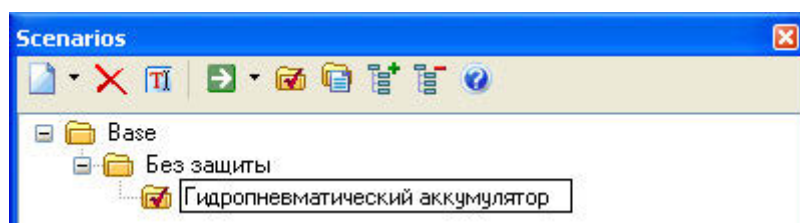


Рис. 13.3. Новый сценарий

Двойным щелчком откройте окно его свойств и задайте альтернативу Active Topology – *Гидропневматический аккумулятор* (рис. 13.4).

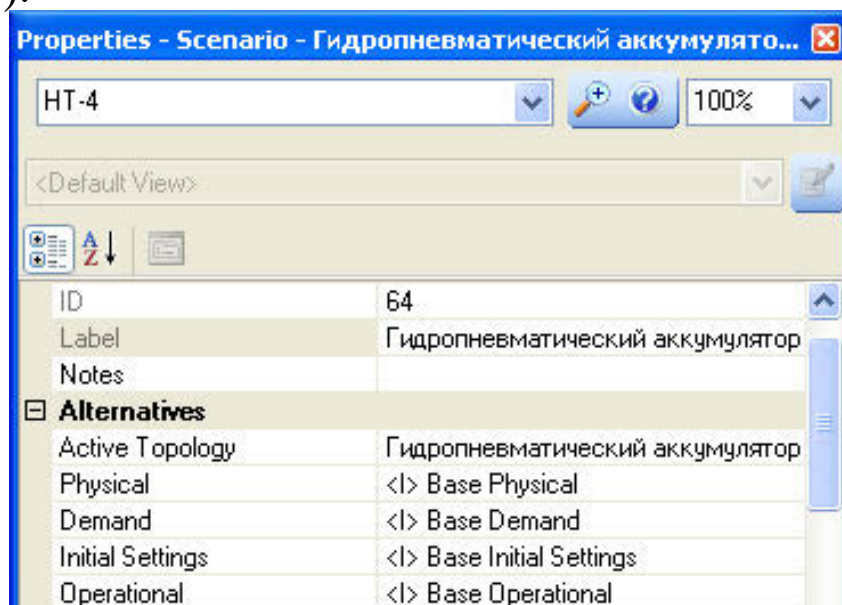



Рис. 13.4. Свойства сценария

Вернитесь в окно схемы сети и установите под узлом J-3 гидропневматический аккумулятор . Соедините его трубами с соседними узлами (рис. 13.5).

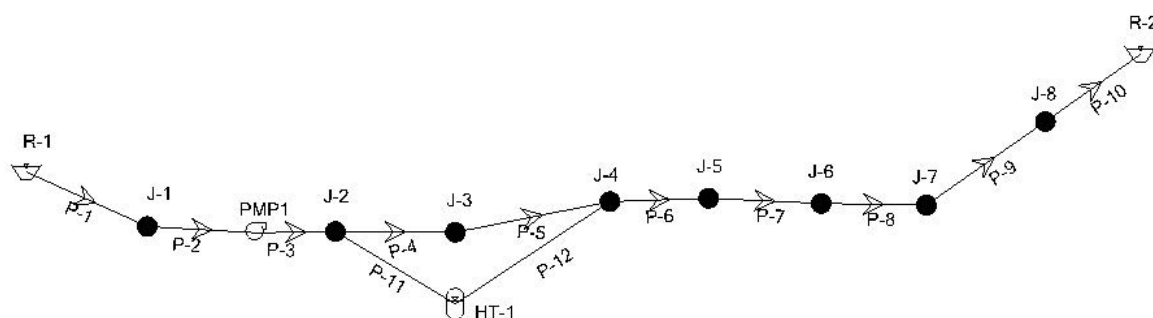


Рис. 13.5. Установка гидропнемоаккумулятора

Введите характеристики новых труб: диаметр 24 дюйма, материал Ductile Iron, скорость распространения волны 1251,5 м/с, длина трубы P-11 20 м, длина трубы P-12 380 м (рис. 13.6).

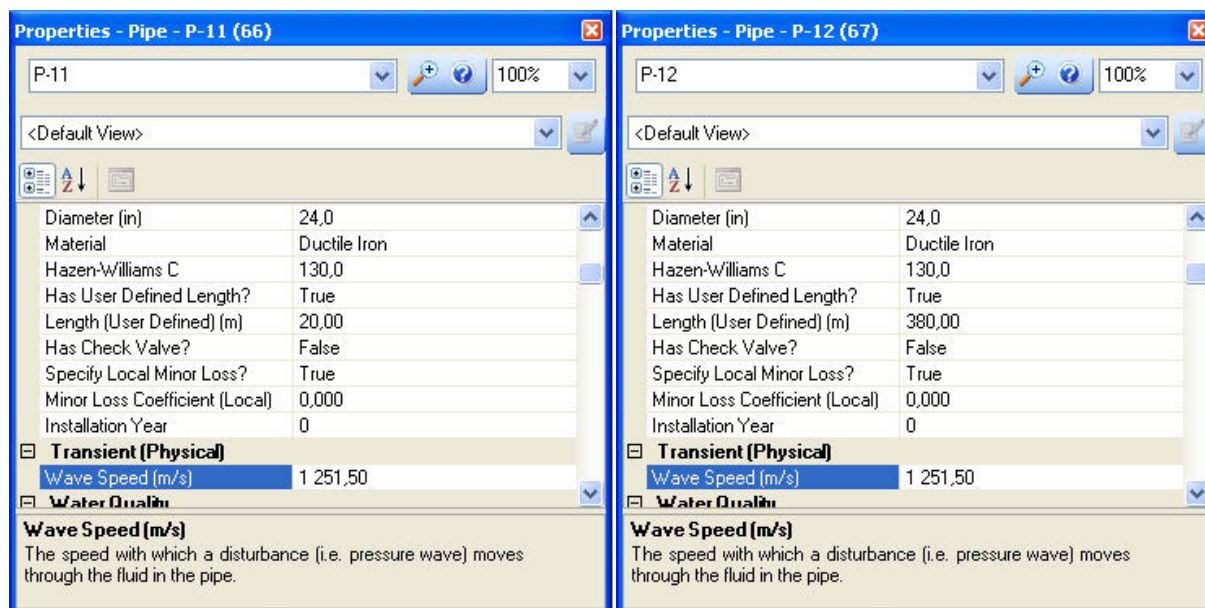





Рис. 13.6. Свойства труб

Теперь необходимо сделать так, чтобы при переключении сценариев активизировались соответствующие схемы.

Установите в качестве текущего сценарий *Без защиты*. Нажмите кнопку меню  – *Выбор активной топологии* или воспользуйтесь соответствующим пунктом меню **Tools** (инструменты).

На экране появится плавающая панель, на которой необходимо нажать кнопку  – *Добавить*. Выделите щелчками трубы P-11, P-12 и аккумулятор. Завершите выбор кнопкой . Выделенные элементы будут исключены из активной топологии (сценария), что сразу отразится на их изображении на экране (рис. 13.7).

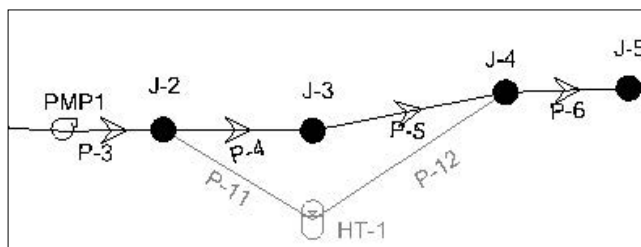


Рис. 13.7. Переключение топологии

Рекомендуем убедиться, что при переключении сценариев происходит переключение топологий и при необходимости повторить операцию еще раз.

Введите следующие параметры аккумулятора (рис. 13.8).

В разделе *Transient (Physical)*:

- Diameter (Tank Inlet Orifice) – диаметр входного отверстия: 12 дюймов;
- Ratio of Losses – отношение потерь напора при входе жидкости в аккумулятор и при выходе из него: 2,5;
- Gas Law Exponent – показатель политропы: 1,2;
- Has Bladder? – наличие эластичной мембраны: *True* (имеется);
- Pressure (Gas-Preset) – начальное избыточное давление газа в аккумуляторе: 0 кПа;
- Minor Loss Coefficient (Inflow) – коэффициент сопротивления на входе: 1,0;
- Elevation Type – изменение уровня воды в аккумуляторе: *Fixed* (фиксированный).

*Примечание.* Программа позволяет при необходимости задать связь между уровнем воды в аккумуляторе и ее объемом.

В разделе *Operating Range*:

- Elevation (Base) – начальный уровень жидкости: 408 м;

---

– Operating Range Type – точка отсчета уровня жидкости при его изменении: *Elevation*;

– HGL (Initial) – гидростатический напор (начальный): 464 м;

– Liquid Volume (Initial) – начальный объем жидкости: 14000 л.

В разделе *Physical*:

– Elevation – высота расположения аккумулятора: 408 м;

– Volume (Tank) – объем аккумулятора: 20000 л;

– Tank Calculation Model – модель расчета: *Gas Law Model* (закон изменения состояния газа).

*Примечание.* Программа позволяет рассчитывать процесс сжатия (расширения) газа приближенно, так называемым методом «эффективной» площади;

– Atmospheric Pressure Head – абсолютная величина атмосферного давления: 9,75 м вод. ст;

– Treat as Junction? – рассматривать ли аккумулятор как узел при расчете начальных условий: *False* (нет).

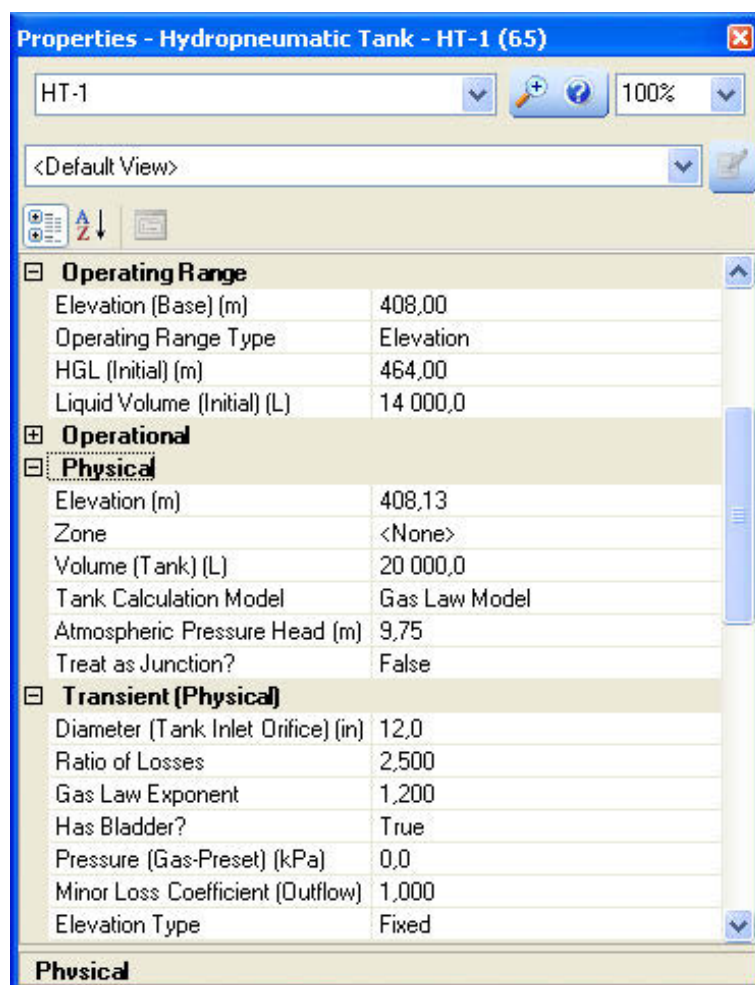



Рис. 13.8. Свойства аккумулятора

Для вновь созданных трубопроводов необходимо создать профиль (*Profiles*). С этой целью нажмите кнопку  или воспользуйтесь одноименным пунктом меню **View**.

В окне *Profiles* нажмите кнопку  для создания нового профиля *HT-1* и включите в него все трубопроводы топологии *Гидропневматический аккумулятор* от резервуара R-1 до R-2 (рис. 13.9).

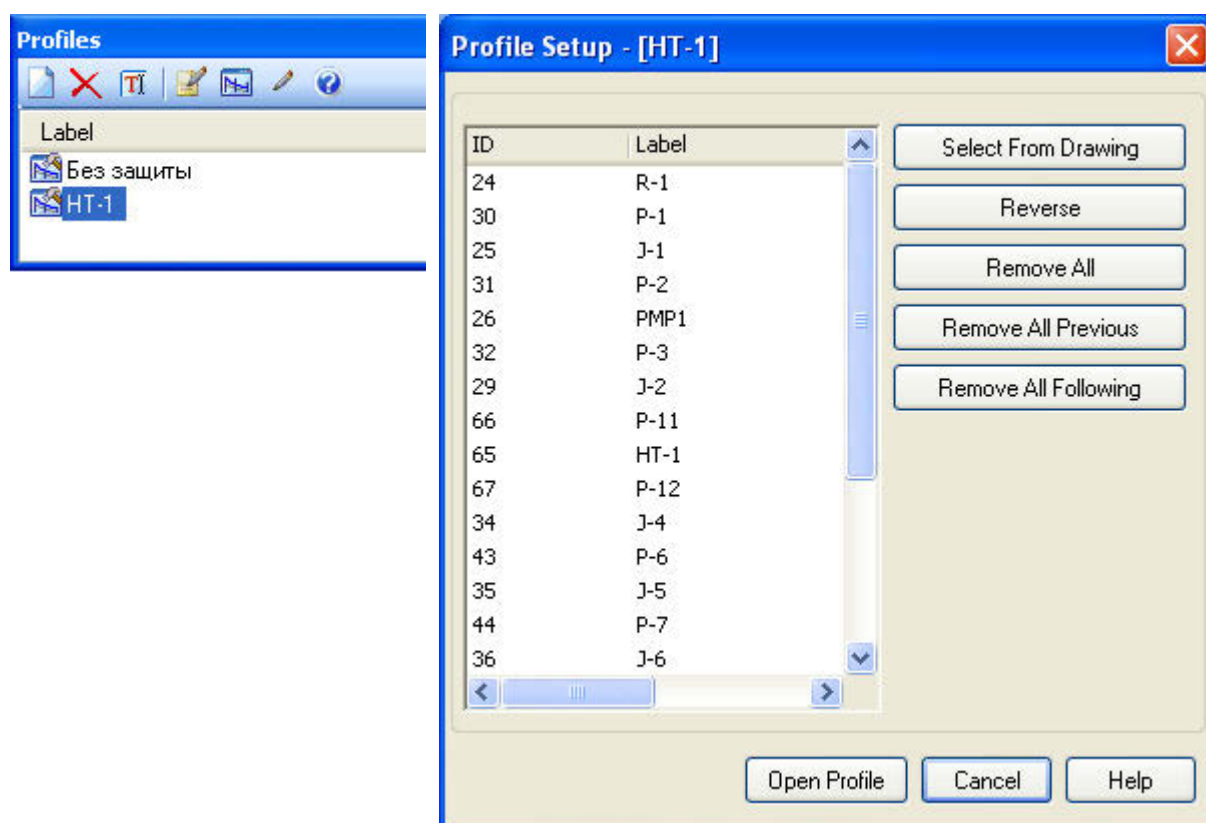


Рис. 13.9. Профиль с гидроаккумулятором

В окне *Profiles* выделите правой кнопкой созданный профиль и убедитесь, что пункт меню *Transient Report Path* отмечен (рис. 13.10).

Сохраните проект и выполните расчет гидравлического удара.

Сравните результат расчета (рис. 13.11) с полученным ранее (см. рис. 12.24). Теперь кавитация отсутствует. Рассматривая процесс распространения волны давления

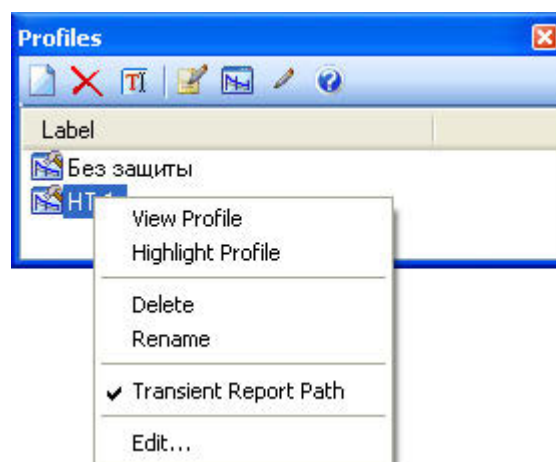


Рис. 13.10. Меню профилей



в режиме анимации, вы заметите, что аккумулятор сглаживает колебания давления. Зафиксируйте максимальное и минимальное значение напора.

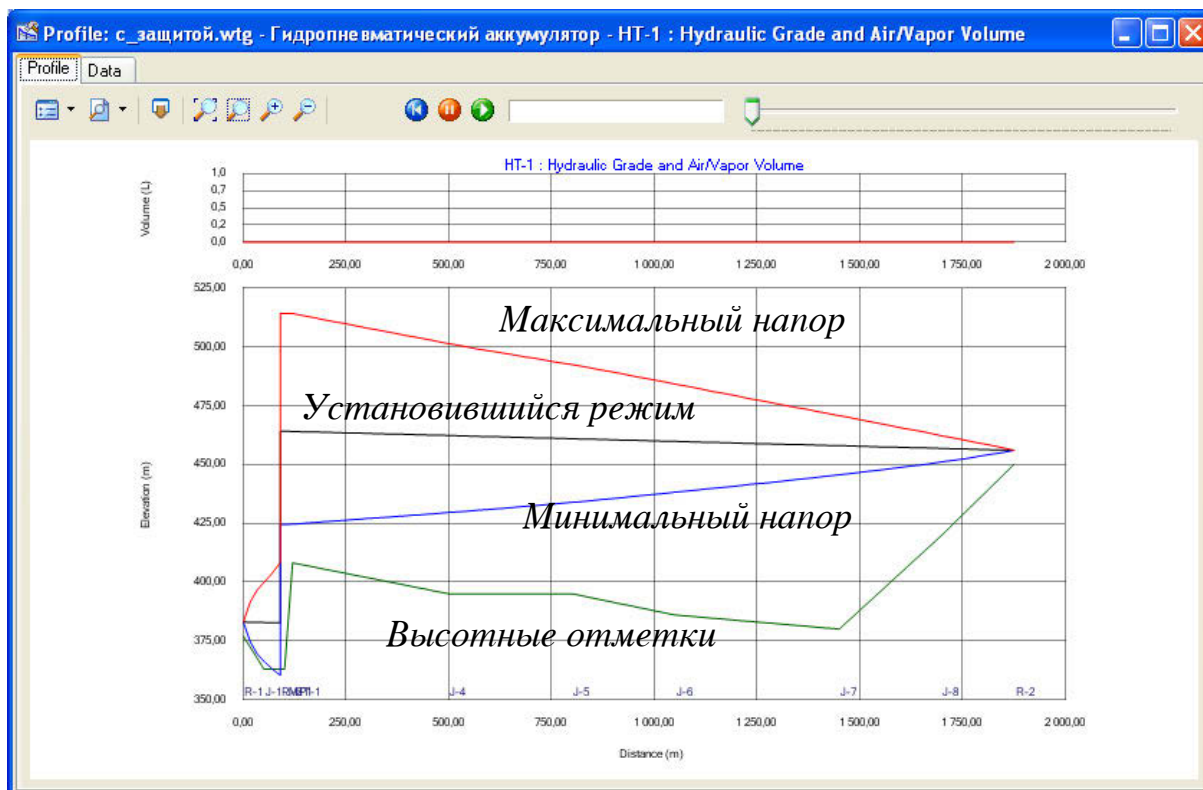


Рис. 13.11. Изменение параметров потока при наличии гидроаккумулятора

Скорее всего, вы обратили внимание, что гидропневмоаккумулятор имеет довольно большой объем  $20 \text{ м}^3$  при начальном объеме жидкости в нем  $14 \text{ м}^3$ . Уменьшение объема аккумулятора снижает эффективность его использования. Предлагаем вам самостоятельно убедиться, что при уменьшении объема аккумулятора давление в трубопроводе существенно увеличивается.

## 13.2. Упреждающий клапан

Упреждающий клапан (Surge-anticipator valve, SAV) устанавливают непосредственно за насосом. В случае внезапной остановки насоса давление в трубопроводе начинает падать. В тот момент, когда оно уменьшается до некоторой заданной величины, клапан открывается, ограничивая минимальное значение давления. Клапан настраивают таким образом, чтобы к моменту приближения к нему



волны высокого давления он был бы еще открыт. Таким образом, резкого увеличения давления в трубопроводе не происходит. Закрытие клапана происходит относительно медленно, чтобы сам он не явился причиной вторичного гидроудара.

Для исследования работы клапана SAV создайте новый сценарий и соответствующую ему альтернативную топологию (рис. 13.12).

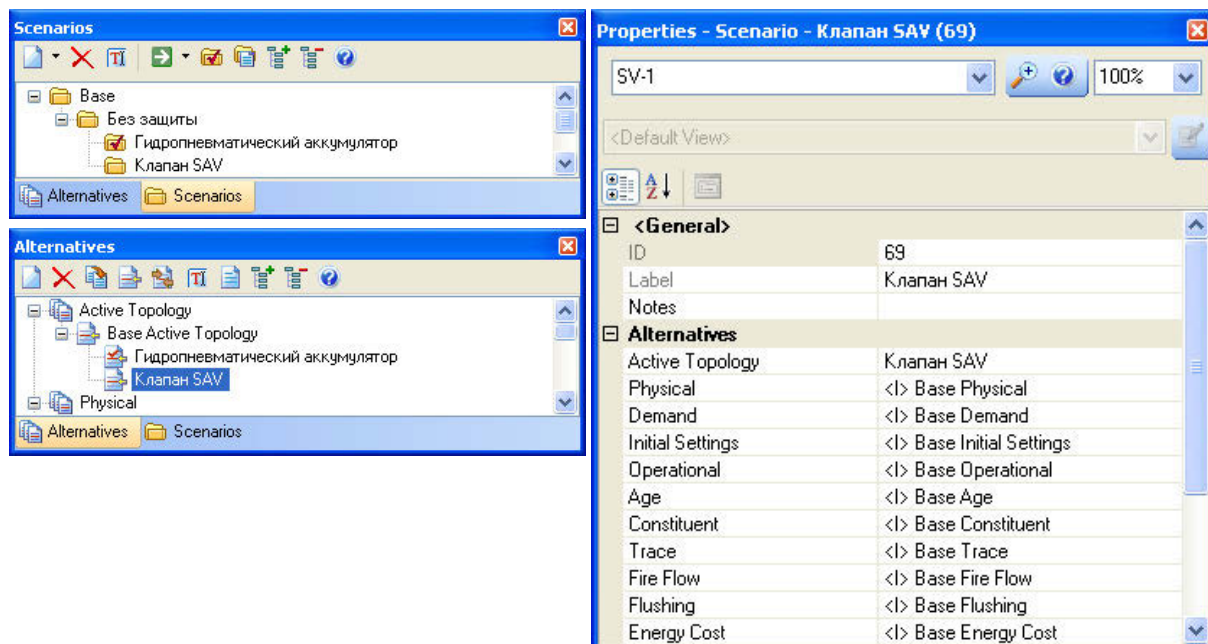



Рис. 13.12. Сценарий и альтернатива для расчета упреждающего клапана

На схеме сети установите клапан  – *Surge Valve* (клапан Surge Valve вы найдете также в меню **Tools – Layout**).

Двойным щелчком откройте окно свойств клапана и введите следующие значения параметров (рис. 13.13).

В разделе *Physical: Elevation* – высота расположения клапана: 408 м.

В разделе *Transient (Physical)*:

- SAV/SRV Type – клапан: *Surge-anticipator valve*;
- Valve Type – тип клапана: *Globe* (шаровой);
- Diameter (SAV) – диаметр: 12,0 дюймов;
- Discharge Coefficient (when SAV Fully Open) – коэффициент расхода полностью открытого клапана:  $0,03 \text{ (м}^3/\text{с)}/\text{м}^{0,5}$ .

В разделе *Transient (Operational)*:

- Threshold Pressure (SAV) – давление настройки клапана: 20 м;
- Time for SAV to Open – время открытия клапана: 2 с;

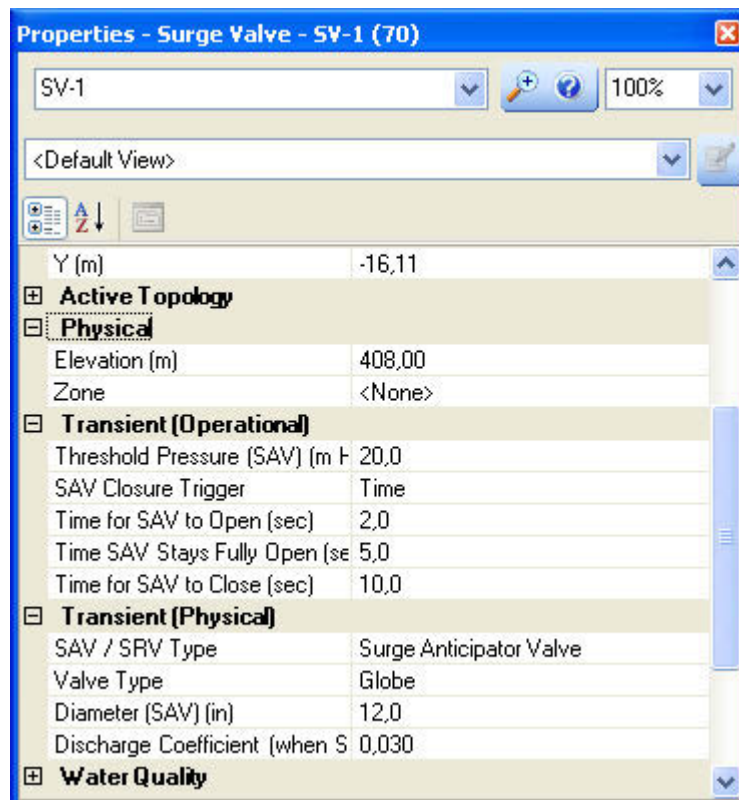


Рис. 13.13. Свойства упреждающего клапана

- Time SAV Stays Fully Open – время нахождения клапана в открытом состоянии: 5 с;
- Time for SAV to Close – время закрытия клапана: 10 с.

Соедините клапан трубопроводами с узлами J-2, J-4. В обозначениях рис. 13.14 эти трубы имеют следующие параметры: диаметр 24 дюйма, материал Ductile Iron, скорость распространения волны 1251,5 м/с, длина трубы P-15 20 м, длина трубы P-16 380 м.

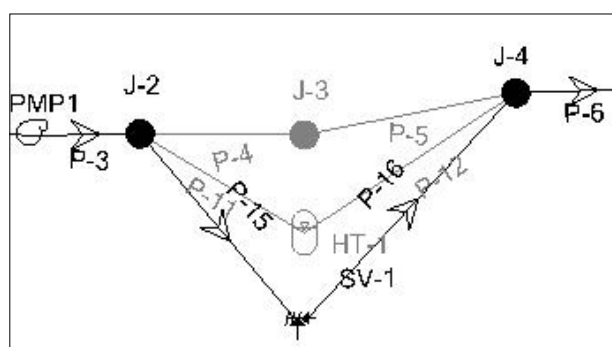




Рис. 13.14. Размещение клапана на схеме

Следуя ранее описанной методике с помощью инструмента  – *Выбор активной топологии*, задайте схему трубопровода, соответствующую новой топологии.

Для вновь созданных трубопроводов необходимо создать профиль (*Profiles*). С этой целью нажмите кнопку  или воспользуйтесь одноименным пунктом меню **View**.

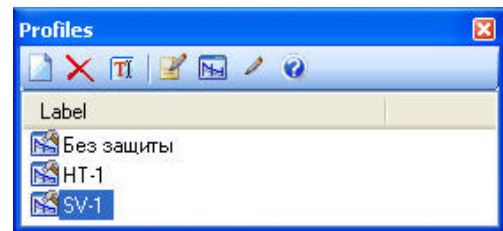



Рис. 13.15. Профиль с клапаном

В окне *Profiles* нажмите кнопку  для создания нового профиля *HT-1* и включите в него все трубопроводы топологии *Клапан SAV* от резервуара R-1 до резервуара R-2.

В окне *Profiles* выделите правой кнопкой созданный профиль и убедитесь, что пункт меню *Transient Report Path* отмечен.

Сохраните проект и выполните расчет гидравлического удара (рис. 13.16). Сравните значения максимального и минимального напора с предыдущим случаем.

Сохраните проект.

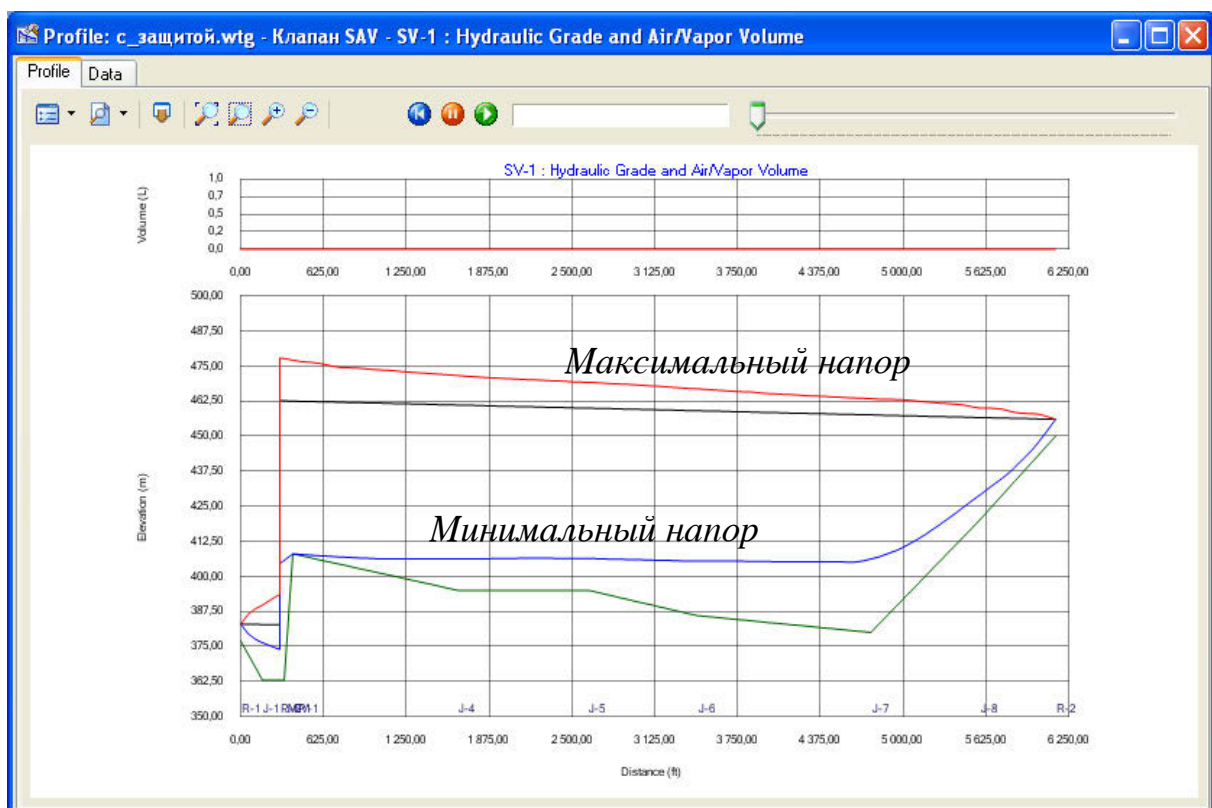


Рис. 13.16. Изменение параметров потока при наличии упреждающего клапана

### 13.3. Демпфирующий клапан

Рассмотрим клапан более сложной конструкции, представляющий собой комбинацию упреждающего и напорного клапана (Surge Relief Valve, SRV). Данный клапан ограничивает не только минимальную



Рис. 13.17. Демпфирующий клапан

величину давления в трубопроводе, но и максимальную (рис. 13.17).

Для исследования этого клапана будет использоваться та же альтернатива топологии. С целью сохранения предыдущих расчетов необходимо создать новую альтернативу типа *Transient*.

Откройте менеджер альтернатив и переименуйте использованную на предыдущем этапе работы базовую альтернативу, например  $SV-1 = SAV$ . Создайте дочернюю альтернативу с именем  $SV-1 = SAV + SRV$  (рис. 13.18).

Создайте сценарий для использования этой альтернативы и установите ее в разделе *Transient* (рис. 13.19).

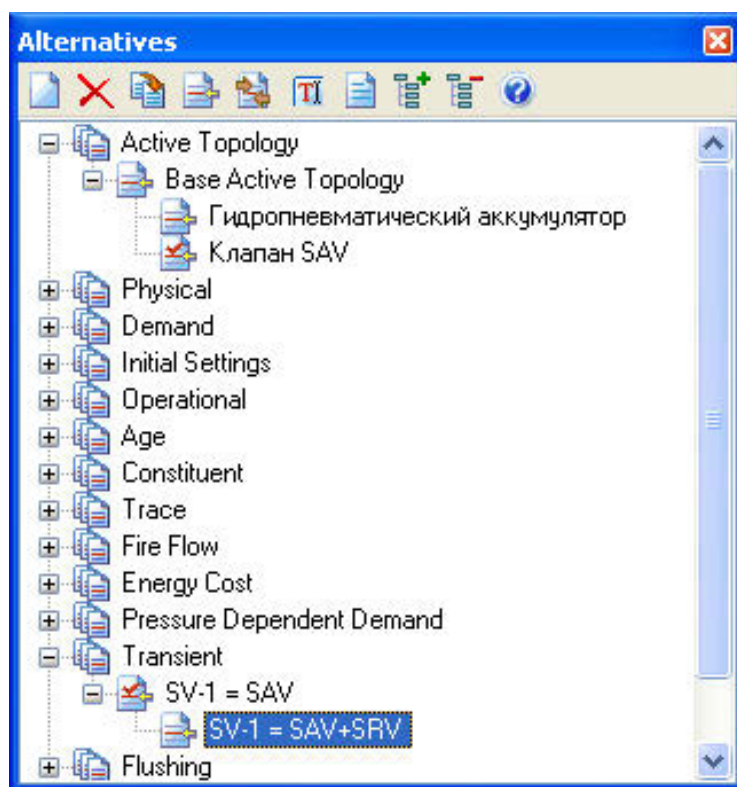


Рис. 13.18. Новая альтернатива

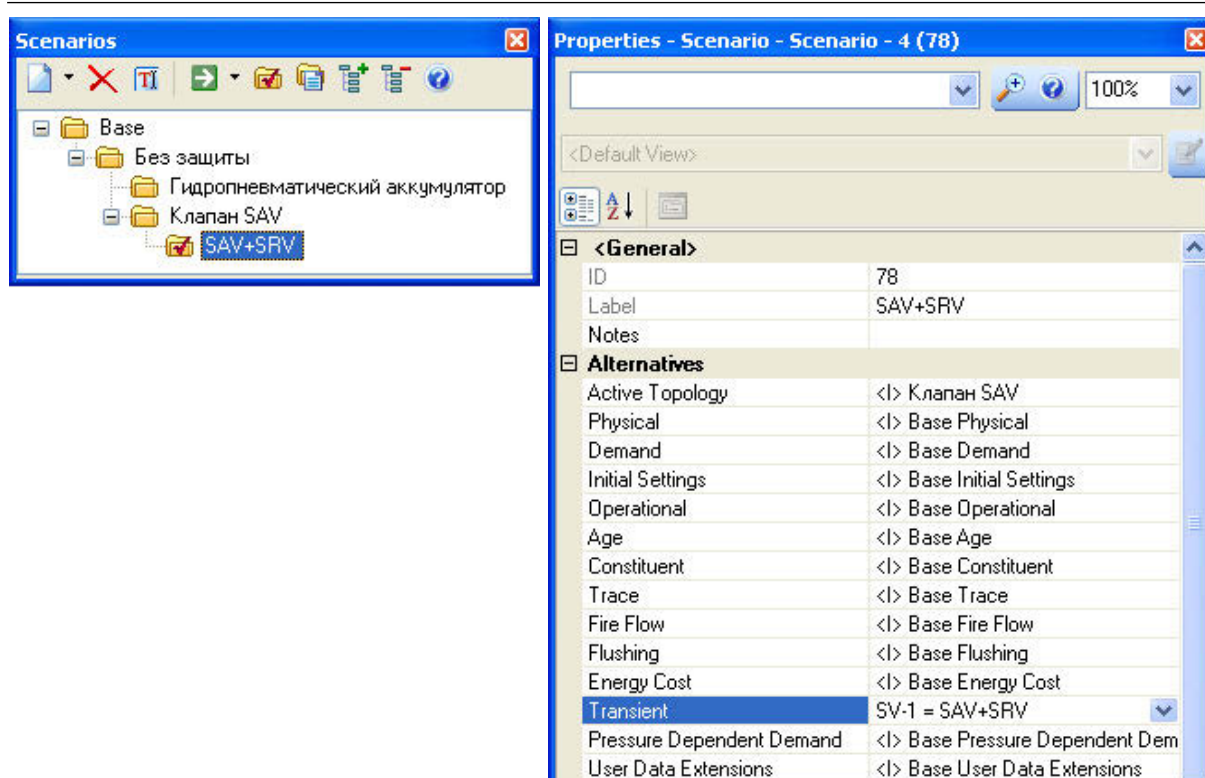


Рис. 13.19. Новый сценарий и его свойства

Откройте окно свойств клапана *SV-1* и введите дополнительные параметры (рис. 13.20).

В разделе *Transient (Physical)*:

- SAV/SRV Type – клапан: *Surge anticipator & Relief Valve*;
- Diameter (SRV) – диаметр: 12,0 дюймов;
- Spring Constant (SRV) – постоянная пружины: 30 Н/мм.

В разделе *Transient (Operational)*: Threshold Pressure (SRV) – давление настройки напорного клапана: 60 м.

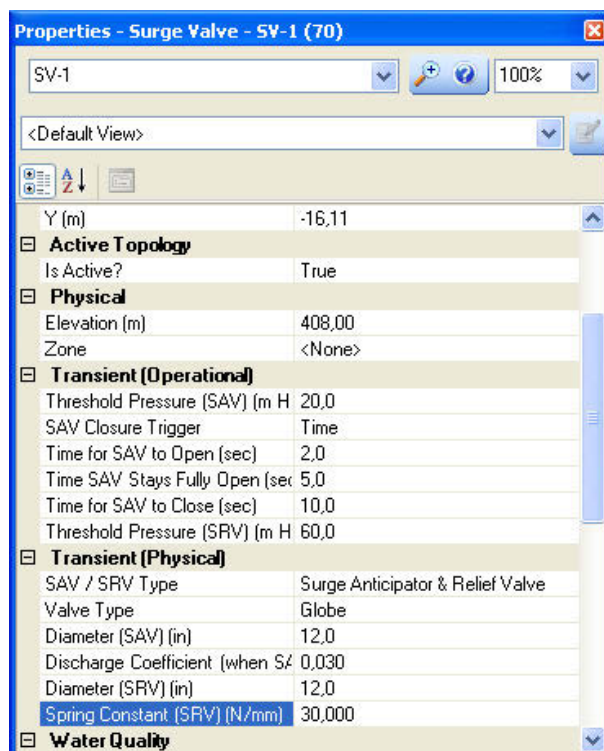
Сохраните проект и выполните расчет по данному сценарию.

Обратите внимание, что максимальные напоры уменьшились, а кривая минимальных напоров осталась без изменения (рис. 13.21).

Зафиксируйте минимальный и максимальный напор с целью сравнения с другими вариантами.

Сохраните проект.





13.20. Свойства демпфирующего клапана

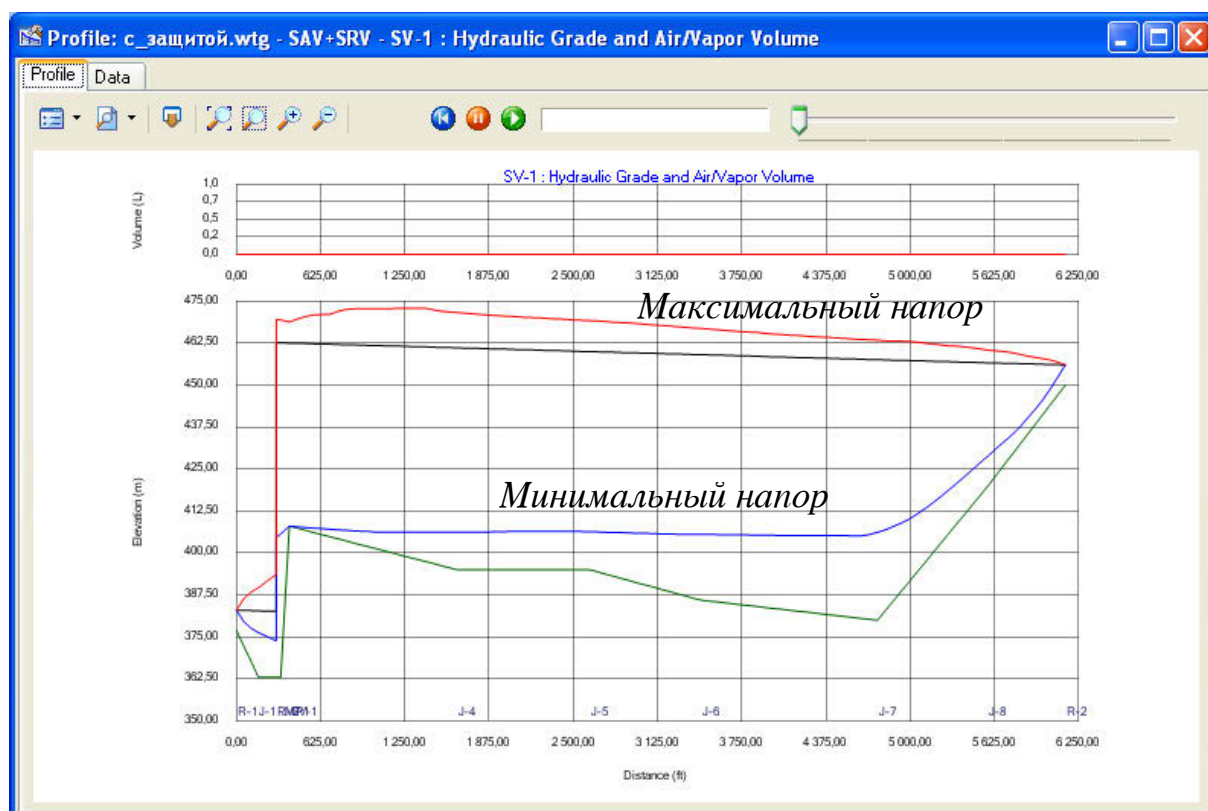


Рис. 13.21. Изменение параметров потока при наличии демпфирующего клапана



### 13.4. Водонапорная колонна

Водонапорная колонна или уравнительный резервуар (Surge tank, stand pipe) представляет собой вертикальный резервуар, высота которого соответствует требуемому свободному напору в сети в точке ее установки. Внутренний объем колонны относительно невелик, поэтому ее использование в качестве водонапорной башни возможно лишь в небольших сетях, например производственного водоснабжения. Значительно чаще колонны используют с целью ограничения превышения напора выше допустимых значений, в том числе при возникновении гидравлических ударов.

На практике используют колонны двух типов: простые и дифференциальные. В данном случае мы рассмотрим простую колонну (рис. 13.22). Она может работать в трех режимах.

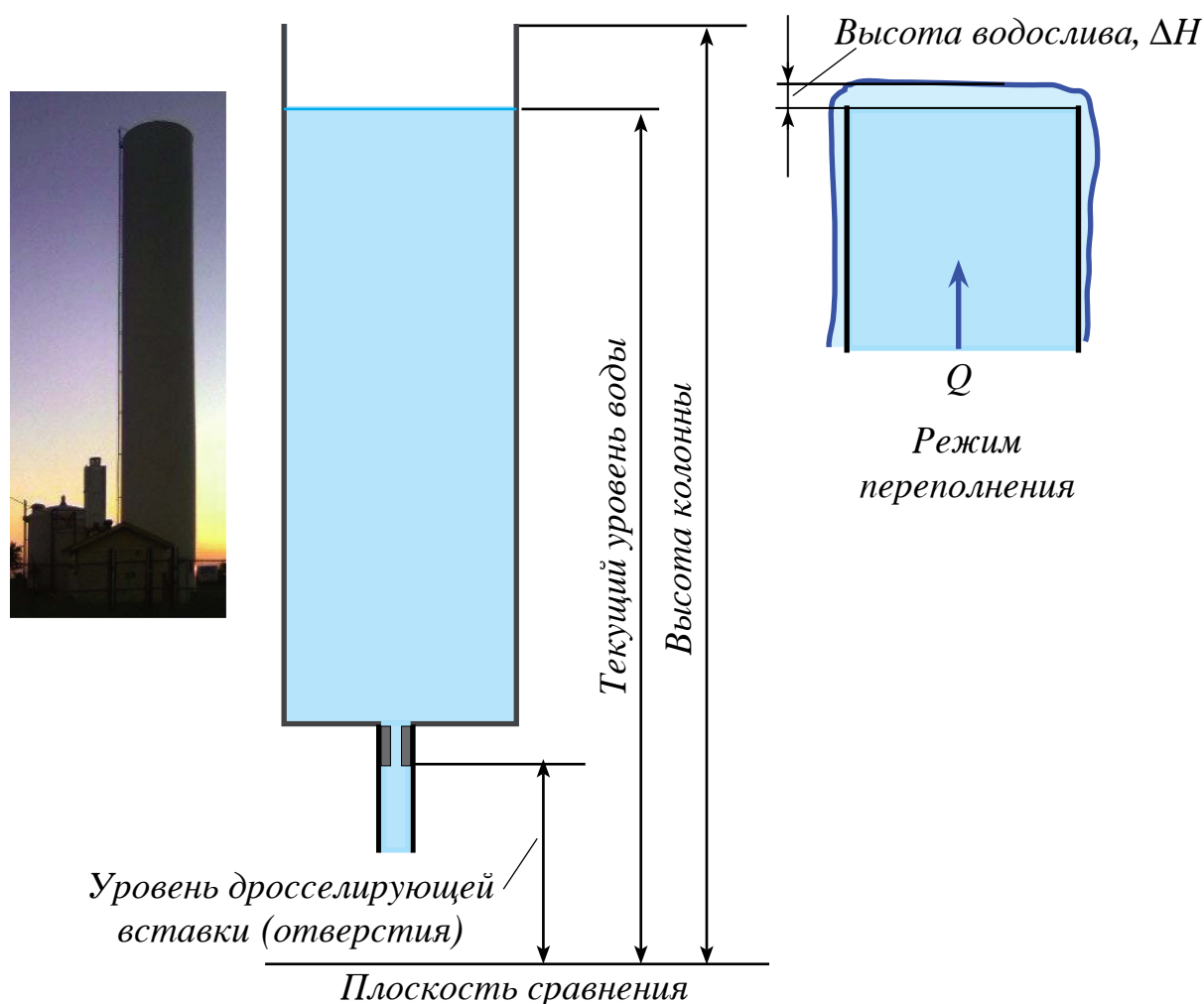


Рис. 13.22. Простая (simple) водонапорная колонна

*Нормальным* называют режим, при котором уровень воды в колонне ниже ее верхней точки, но выше точки присоединения к трубопроводам сети.

*Режим переполнения* соответствует случаю, когда уровень достигает высоты колонны и вода переливается через ее край. В этом случае расход через верхний край колонны

$$Q = KL\Delta H^{3/2},$$

где  $K$  – коэффициент расхода водослива,  $L$  – его длина (в нашем случае длина окружности поперечного сечения колонны).

*Дренажный* режим возникает, когда уровень воды снижается до точки присоединения колонны к трубопроводам сети. В этом случае возможно проникновение воздуха в трубопроводы, что не допускается.

С целью уменьшения колебания уровня воды в колонне при изменении напора в сети на входе в нее может размещаться дросселирующая вставка.

Для исследования работы колонны создайте новый сценарий и соответствующую ему альтернативную топологию (рис. 13.23).

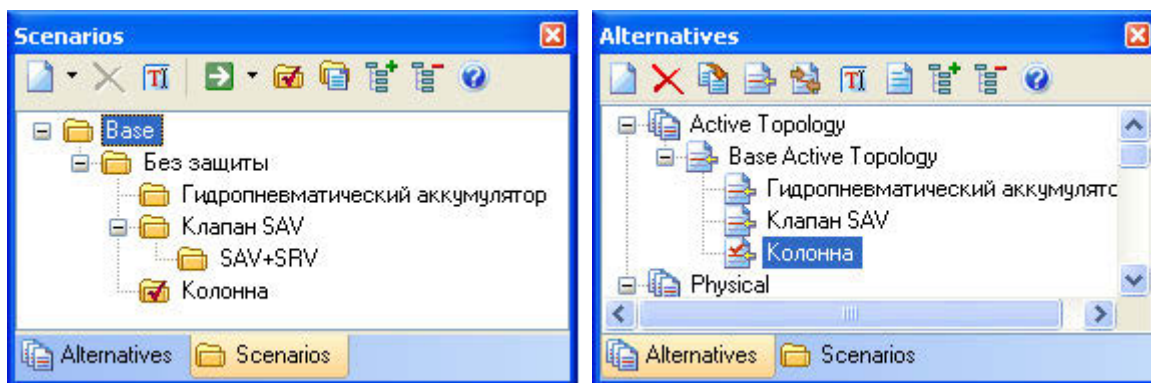


Рис. 13.23. Сценарий и альтернатива для расчета водонапорной колонны

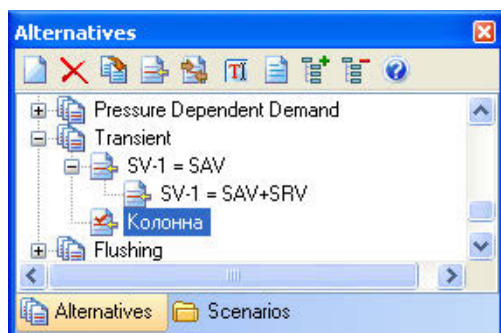


Рис. 13.24. Новая альтернатива *Transient*

С целью сохранения предыдущих расчетов необходимо создать новую альтернативу типа *Transient* (рис. 13.24).

Все рассмотренные ранее устройства для защиты трубопровода не влияли на его работу в стационарном режиме. Следовательно, начальные

условия (Initial Setting) при решении уравнений распространения волны давления были одинаковыми. В данном случае начальные условия будут иными, а поэтому создайте альтернативу типа *Initial Setting* (рис. 13.25).

Двойным щелчком откройте созданный ранее сценарий и задайте его альтернативы *Active Topology*, *Initial Setting* и *Transient* (рис. 13.26).

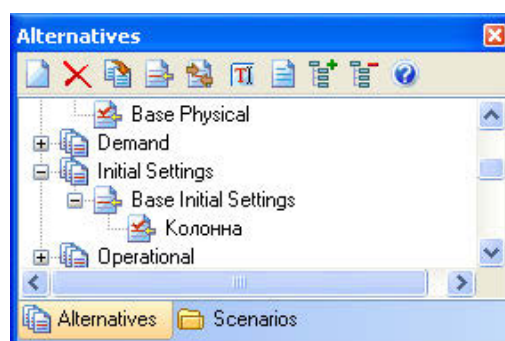


Рис. 13.25. Новая альтернатива *Initial Setting*

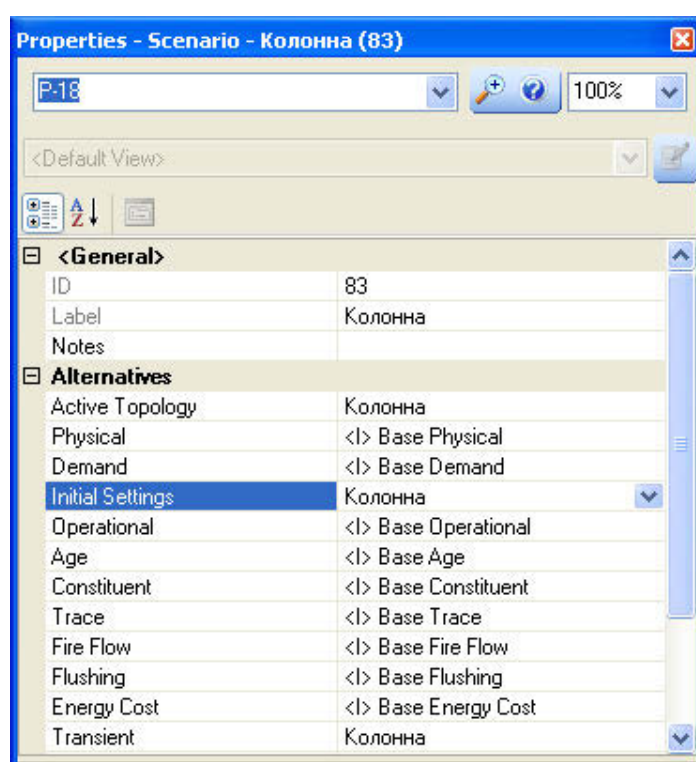




Рис. 13.26. Свойства сценария «Колонна»

На схеме сети установите колонну  – *Surge Tank (ST)*. Соедините ее трубопроводами с узлами J-2, J-4. В обозначениях рис. 13.27 эти трубы имеют следующие параметры: диаметр 24 дюйма, материал *Ductile Iron*, скорость распространения волны 1251,5 м/с, длина трубы P-17 – 20 м, длина трубы P-18 – 380 м.

Следуя ранее описанной методике с помощью инструмента  – *Выбор активной топологии*, задайте схему трубопровода, соответствующую новой топологии.

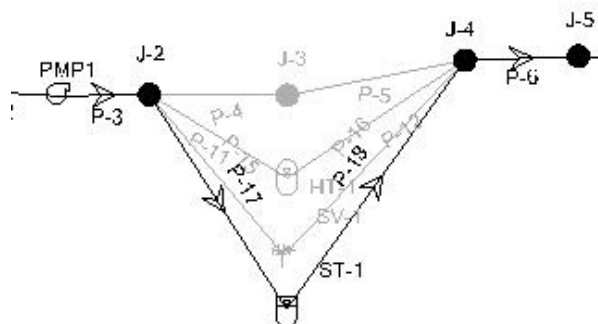




Рис. 13.27. Водонапорная колонна на схеме сети

Убедитесь, что при переключении сценариев переключение схемы сети происходит правильно.

Для вновь созданных трубопроводов необходимо создать профиль (*Profiles*). С этой целью нажмите кнопку  или воспользуйтесь одноименным пунктом меню **View**.

В окне *Profiles* нажмите кнопку  для создания нового профиля *HT-1* и включите в него все трубопроводы топологии *Колонна* от резервуара R-1 до резервуара R-2.

Двойным щелчком откройте окно свойств колонны и введите следующие параметры (рис. 13.28).

В разделе *Operating Range*:

- *Operating Range Type* – точка отсчета уровня жидкости при его изменении: *Elevation*;

- *Elevation (Base)* – высота установки колонны: 408 м;

- *Elevation (Minimum)* – минимальный уровень воды: 408 м;

- *Elevation (Initial)* – начальный уровень воды: 464 м;

- *Elevation (Maximum)* – максимальный уровень воды: 467 м.

В разделе *Physical*:

- *Elevation* – высота установки колонны: 408 м;

- *Section* – форма поперечного сечения колонны: *Circular* (круг);

- *Diameter* – диаметр: 1,5 м.

В разделе *Transient (Physical)*:

- *Surge Tank Type* – тип колонны: *Simple* (простая);

- *Has Check Valve?* – наличие обратного клапана: *False* (нет);

- *Weir Coefficient* – коэффициент расхода водослива  $K$ :  
1,38 м<sup>0,5</sup>/с;

- *Weir Length* – длина водослива: 4,71 м;

- Diameter (Orifice) – диаметр дросселирующего отверстия: 8 дюймов;
- Ratio of Losses – коэффициент потерь напора в отверстии: 2,5;
- Headloss Coefficient – коэффициент потерь напора при истечении воды из колонны: 1.

**Properties - Surge Tank - ST-1 (79)**

ST-1 100%

<Default View>

**Operating Range**

Operating Range Type	Elevation
Elevation (Base) (m)	408,00
Elevation (Minimum) (m)	408,00
Elevation (Initial) (m)	464,00
Elevation (Maximum) (m)	467,00
Use High Alarm?	False
Use Low Alarm?	False

**Operational**

**Physical**

Volume Full (Calculated) (m³)	104,26
Elevation (m)	408,00
Zone	<None>
Volume (Inactive) (m³)	0,00
Installation Year	0
Section	Circular
Diameter (m)	1,50
Treat as Junction?	False

**Transient (Physical)**

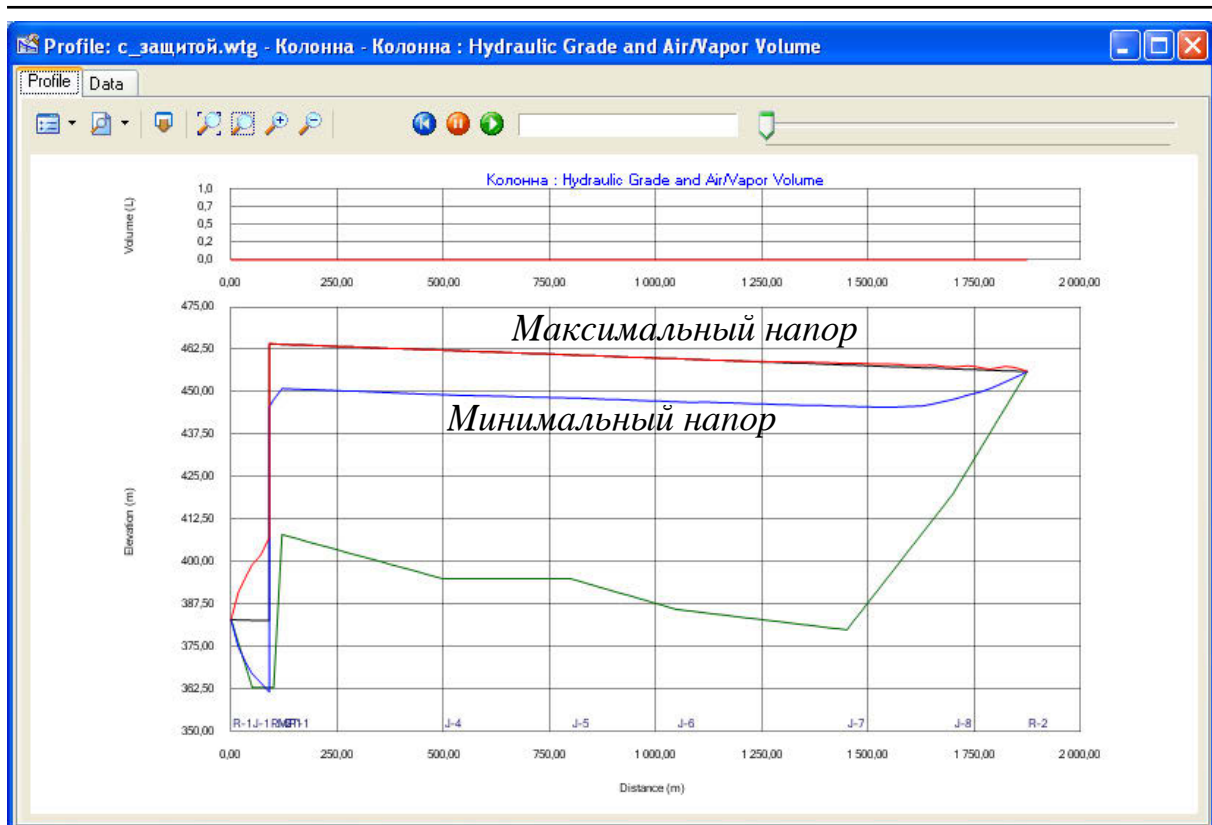
Surge Tank Type	Simple
Has Check Valve?	False
Weir Coefficient ((m <sup>0.5</sup> )/s)	1,38
Weir Length (m)	4,71
Diameter (Orifice) (in)	8,0
Ratio of Losses	2,500
Headloss Coefficient	1,000

**Operating Range**

Рис. 13.28. Свойства водонапорной колонны

Сохраните проект и выполните расчет по сценарию *Колонна*.

Сравните значения минимального и максимального напора с другими вариантами. Обратите внимание, что повышения давления при гидравлическом ударе практически нет (рис. 13.29).



*Рис. 13.29. Характер изменения параметров потока  
при наличии водонапорной колонны*

Имеет место лишь снижение давления, но оно не приводит к кавитации. Предлагаем вам убедиться, что уменьшение диаметра дросселирующего отверстия приводит к уменьшению давления в трубопроводе. Чем это можно объяснить?



## 14. Переходные процессы в гидравлической сети

### 14.1. Постановка задачи и расчет начальных условий

В этом разделе будут рассмотрены особенности расчета переходных процессов в распределительной сети водоснабжения и некоторые способы уменьшения негативных последствий гидравлических ударов.

После запуска программы Hammer откройте заранее подготовленный файл проекта *Lesson3\_Hammer.wtg* (предоставлен фирмой Bentley). Сохраните проект (рис. 14.1) в своей папке.

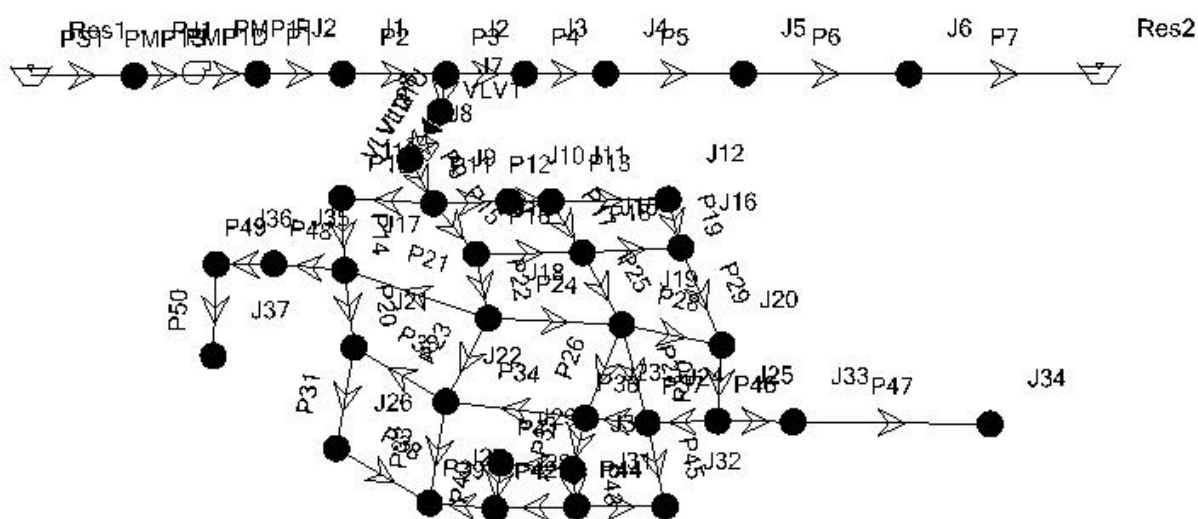


Рис. 14.1. Схема сети

Обратите внимание, что форматы файлов *Hammer* и *WaterGEMS* совпадают. Таким образом, если вы уже создали схему сети и проанализировали ее работу в стационарных условиях с помощью программы *WaterGEMS*, вводить схему сети нет необходимости.


В данной сети источником водоснабжения является насос. Мы рассмотрим ситуацию, которая возникнет при его внезапном отключении, например при перебоях в электропитании.

Перед началом расчета задайте требуемые свойства некоторых элементов сети.

Двойным щелчком откройте окно свойств резервуара Res1. В разделе *Transient(Physical)* задайте высоту присоединения трубопровода: *Elevation (Inlet/Outlet Invert)*: 377 м.


---

Задайте значение этого параметра для резервуара Res2: *Elevation (Inlet/Outlet Invert)*: 450 м.

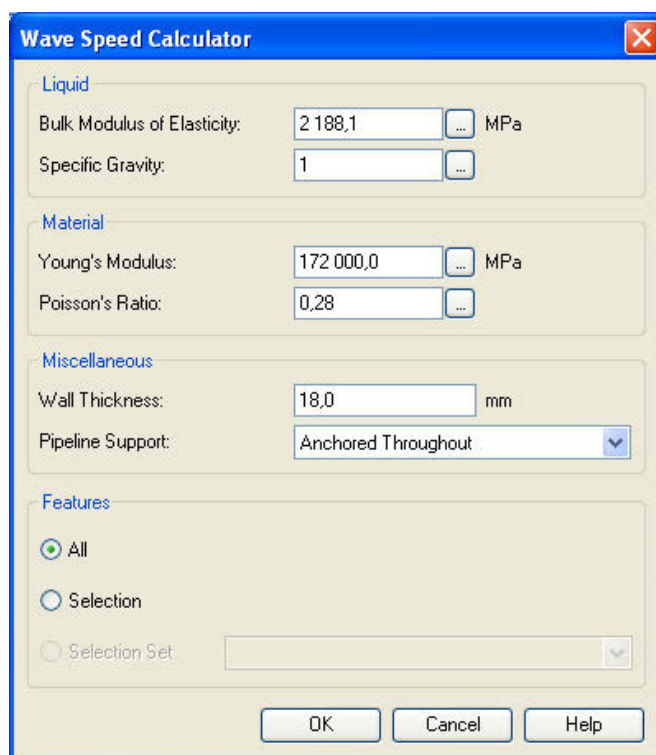
Выполните предварительный расчет сети. Для этого нажмите кнопку  или воспользуйтесь пунктом меню **Analysis – Compute Initial Conditions** (расчет начальных условий).

Расчет должен показать, что к резервуару Res2 поступает приблизительно 740 м<sup>3</sup>/ч. В распределительную сеть, подключенную к магистральному трубопроводу в узле J2, подается 954 м<sup>3</sup>/ч.

Теперь нужно рассчитать скорость распространения волны давления. Для выполнения данного расчета предназначен специальный калькулятор, входящий в состав Hammer (рис. 14.2). Для его запуска воспользуйтесь пунктом меню **Tools – Wave Speed Calculator**.

Для ввода необходимых параметров воспользуйтесь библиотеками свойств жидкостей и материалов. Для открытия соответствующих библиотек нажмите кнопку . В нашем случае: жидкость – вода при температуре 4 °С, материал труб – Ductile Iron. Толщина стенки трубы 18 мм. Способ крепления по умолчанию.

После нажатия кнопки ОК калькулятор рассчитает скорость распространения волны давления во всех 55 трубах сети. Вы можете убедиться в этом с помощью таблицы *Pipe Table*.




The image shows a software dialog box titled "Wave Speed Calculator". It is divided into four sections: "Liquid", "Material", "Miscellaneous", and "Features".

- Liquid**: Bulk Modulus of Elasticity is 2 188,1 MPa; Specific Gravity is 1.
- Material**: Young's Modulus is 172 000,0 MPa; Poisson's Ratio is 0,28.
- Miscellaneous**: Wall Thickness is 18,0 mm; Pipeline Support is set to "Anchored Throughout".
- Features**: The "All" radio button is selected. Below it, "Selection" and "Selection Set" are unselected, with a dropdown menu next to "Selection Set".

At the bottom of the dialog are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Рис. 14.2. Калькулятор скорости распространения волны давления

Далее необходимо настроить опции расчета. Активизируйте пункт меню **Analysis – Calculation Options** или нажмите кнопку .

Двойным щелчком по *Base Calculation Options* (под изображением папки Transient Solver) откройте окно свойств расчета *Properties* (рис. 14.3) и введите следующие данные:

В разделе Summary (Аннотация) установите следующие параметры:

- Run Duration Type – тип расчетов: *Time* (время);

- Run Duration – расчетный период: 160 сек;

- Pressure Wave Speed – скорость распространения волны давления: 0 м/с (по умолчанию);

- Vapor Pressure – давление насыщенных паров (избыточное): – 100 kPa;


- Generate Animation Data – создание анимации: True (да);

- Run Extended CAV – рассчитать кавитацию?: True (да).

В разделе *Report* (Отчет) установите следующие параметры:

- *Show Pocket Open/Closing* – отображать время образования / схлапывания кавитационных пузырьков?: True (да);

- *Report Point* – точки, включаемые в отчет: Selected Point (избранные точки).

В поле *Report Points Collection* нажмите кнопку  и выберите точки для включения в отчет о результатах расчета (рис. 14.4).

Установите в поле *Report Times* значение *Periodically*. В поле *Report Period* введите 10 с. Это значение определяет только периодичность вывода данных в процессе их представления в режиме анимации. Вид окна свойств расчета показан на рис. 14.5.

Далее необходимо указать так называемый профиль, т. е. цепочку последовательных трубопроводов, в которых будет рассчитываться распространение волны давления.

С этой целью нужно активизировать пункт меню **View – Profiles**. Далее с помощью кнопки *New* создайте новый профиль. В появившемся окне *Profile setup* нажмите *Select from Drawing* (выбрать из схемы).

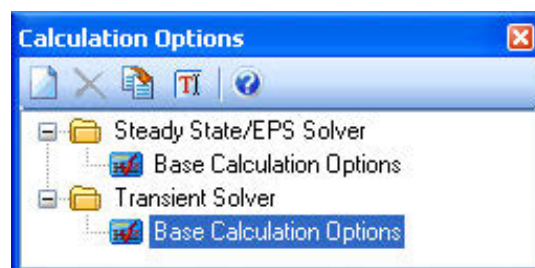


Рис. 14.3. Окно опций расчета

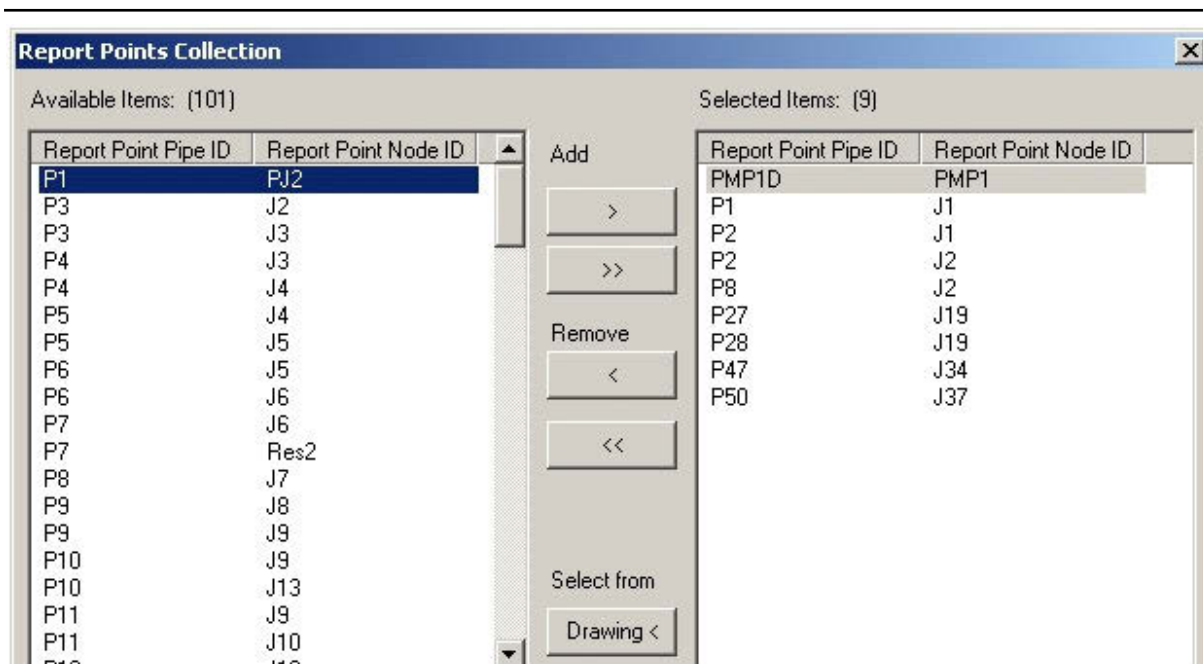


Рис. 14.4. Избранные точки

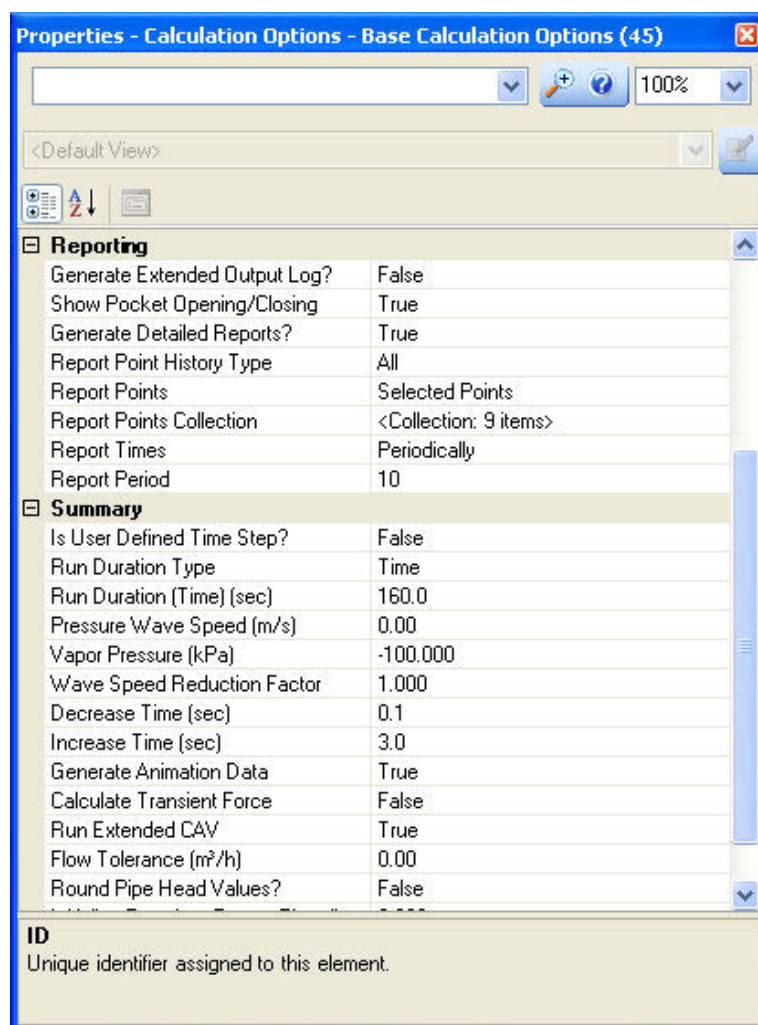


Рис. 14.5. Свойства расчета

На схеме сети выделите трубы PMP1D, P1, P2, P3, P4, P5, P6 и P7 (обратите внимание, что при выборе какой-либо трубы связанные с ней узлы также считаются выбранными).

Для просмотра профиля нажмите кнопку *Open Profile*. В нашем примере профиль имеет имя *Path1* (рис. 14.6).



Рис. 14.6. Изменения параметров по выбранному профилю

На следующем шаге работы данный профиль необходимо настроить как *Transient Report Path*. Иными словами, необходимо указать, что именно в этой цепочке трубопроводов программа должна рассчитать распространение волны давления. Напоминаем, что для этого нужно щелкнуть правой клавишей мыши по наименованию профиля и отметить соответствующий пункт контекстного меню.

Действуя по аналогии, создайте еще два профиля:

- *Path2*, включающий трубы PMP1D, P1, P2, P8, VLV1U, VL-V1D, P9, P10, P14, P48, P49, P50 (рис. 14.7);
- *Path3*, включающий трубы PMP1D, P1, P2, P8, VLV1U, VL-V1D, P9, P15, P22, P24, P28, P30, P46, P47 (рис. 14.8).

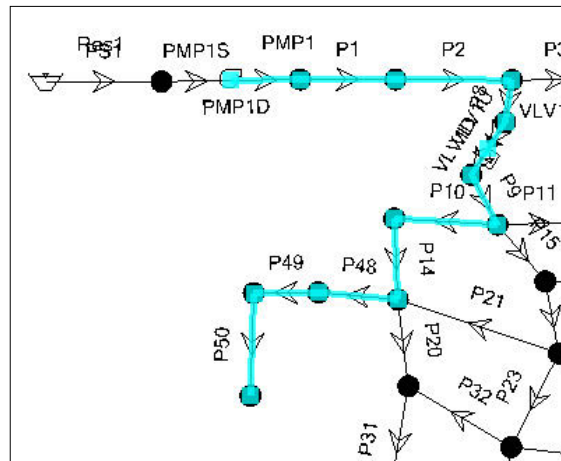


Рис. 14.7. Профиль Path2

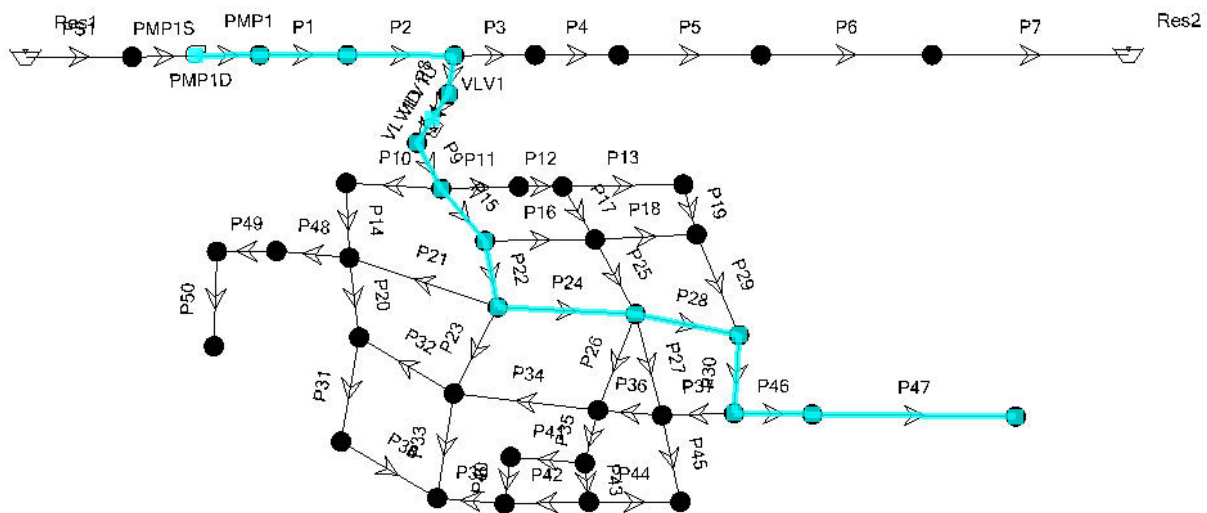


Рис. 14.8. Профиль Path3

Убедитесь, что для этих профилей включена опция *Transient Report Path*. Сохраните проект.

## 14.2. Расчет распространения волны давления

При расчете переходного процесса в простом трубопроводе мы моделировали гидравлический удар, который возникает при внезапной остановке насоса. В данном случае мы рассмотрим гидравлический удар, вызванный аварийным выключением и последующим перезапуском насоса. Нарушение энергоснабжения часто приводит к тяжелым последствиям. Однако повторный запуск насоса до того момента, как энергия гидравлического удара будет погашена, может быть еще более опасным.



Для моделирования гидравлических ударов при аварийном выключении и перезапуске насоса необходимо задать время, в течение которого происходит остановка и запуск насоса. Это можно сделать путем установки привода насоса с переменной скоростью вращения.

Для выполнения расчета необходимо создать альтернативу и соответствующий сценарий. Ранее эта процедура иллюстрировалась уже неоднократно (рис. 14.9).



Рис. 14.9. Сценарий и альтернатива *Existing System*

Открыв двойным щелчком окно свойств сценария *Existing System* (существующая система), установите активную топологию сети (рис. 14.10).

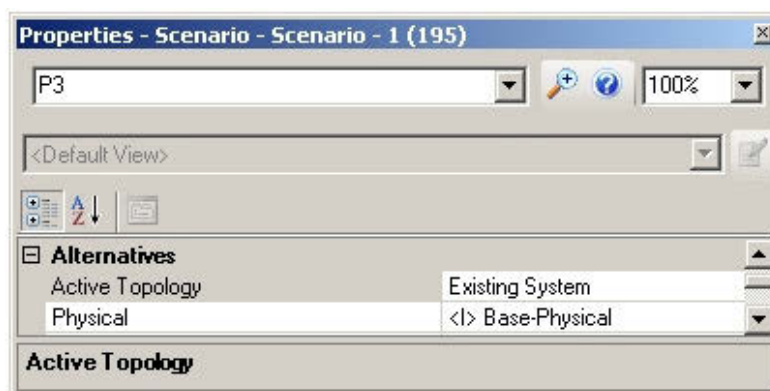


Рис. 14.10. Активная топология

Задайте параметры насоса. Нажав дважды на его изображение на схеме, откройте окно свойств *Properties*.

Для управления временем разгона регулируемого насоса можно использовать как *Speed* (скорость), так и *Torque* (момент инерции). В данном случае будет использоваться первый способ.

В разделе *Transient (Operational)* в поле *Pump Type (Transient)* необходимо выбрать из выпадающего меню *Variable Speed/Torque*, а в разделе *Control Variable* (управляющая переменная) – *Speed*.

Задайте следующие параметры обратного клапана насоса в разделе *Transient (Operational)*:

- Diameter (Pump Valve) (mm) – диаметр: 575;
- Time (For Valve to Operate) (sec) – время закрытия: 0.

Обратите внимание, что в пункте *Operating Rule* (правило управления) указан параметр *Fixed* (фиксированное). Это означает, что правила управления насосом пока не заданы (рис. 14.11). В выпадающем меню этого пункта выберите *<Edit...>* для открытия окна *Patterns* (графики).

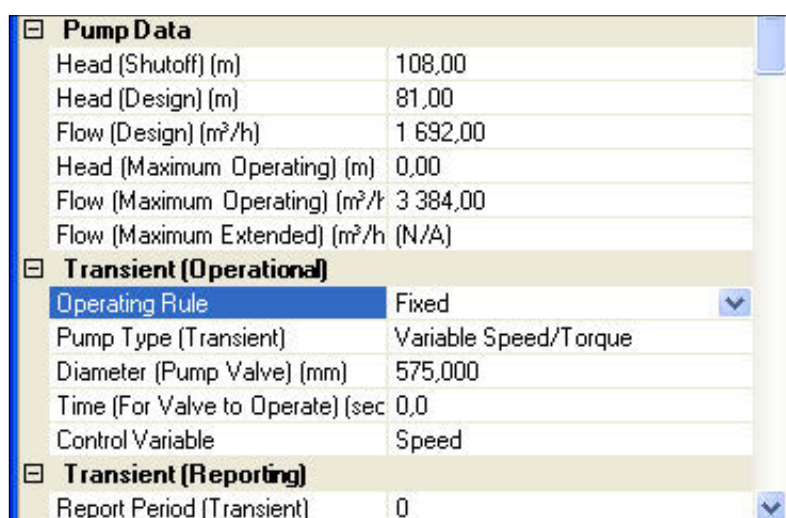


Рис. 14.11. Свойства насоса (фрагмент)

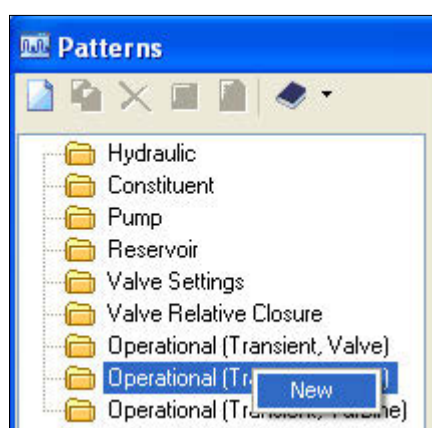


Рис. 14.12. Окно Patterns

Щелкните правой кнопкой по пункту *Operational (Transient, Pump)* (управление насосом при переходном процессе) и создайте новый график (рис. 14.12).

В нашем примере новый график назван *PMP1*.

Изменение скорости вращения насоса во времени задается множителем *Relative Speed Multiplier*. Введите его значения в соответствии с нашим примером (рис. 14.13).

В данном случае моделируется следующая ситуация. В течение 5 с после начала расчета насос работает с постоянной скоростью. В течение следующих 5 с скорость вращения уменьшается до нуля.

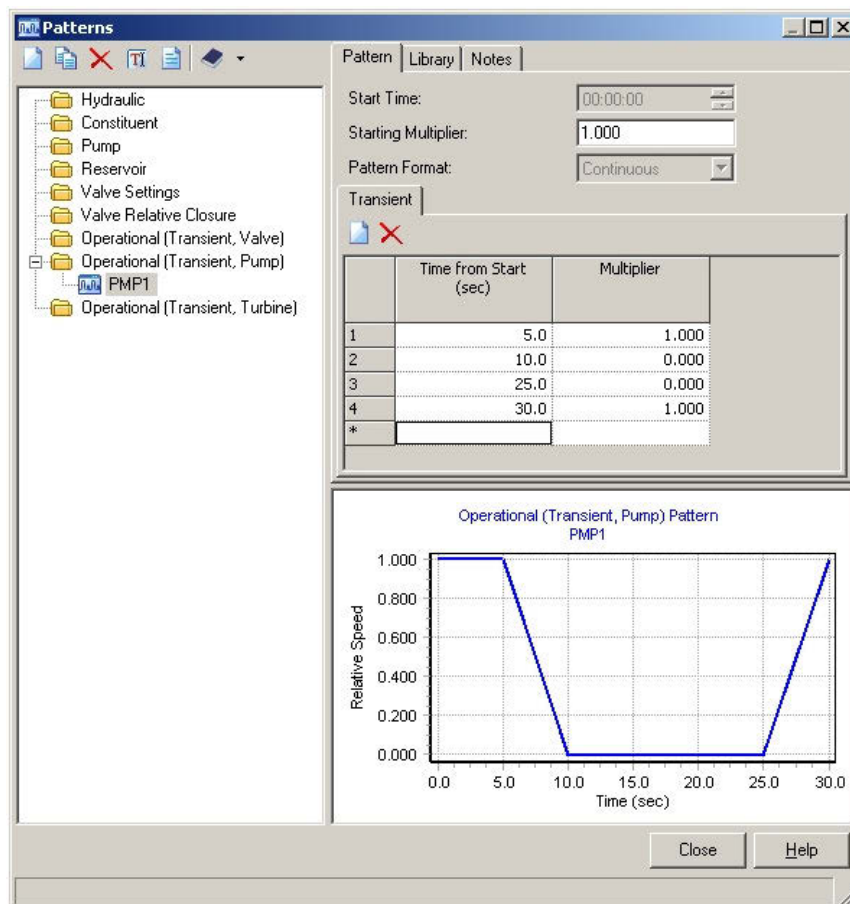


Рис. 14.13. График изменения скорости насоса

Через 15 с осуществляется повторный запуск насоса, когда скорость его вращения за 5 с возрастает до максимальной.

Закройте окно *Patterns* для возврата к окну свойств насоса. Убедитесь, что в пункте *Operational (Transient, Pump)* задан график управления *PMP1*.

В разделе *Physical* должна быть указана высота установки насоса (*Elevation*) 363 м. В пункте *Pump Definitions* (определения насоса) выберите *Edit Pump Definitions* (редактирование определения насоса).

В нашем примере используется самый простой способ задания рабочей характеристики насоса – по одной точке: подача 1692 м³/час при напоре 81 м (рис. 14.14).

На вкладке *Efficiency* следует указать, что КПД насоса постоянный (*Constant Efficiency*) и равен 85 % (рис. 14.15).

На вкладке *Transient* необходимо задать (рис. 14.16):

– момент инерции вращающихся частей насоса и двигателя *Inertia (Pump and Motor)*: 169 Н·м²;

- скорость вращения *Speed* (Full): 1760 с<sup>-1</sup>;
- Specific Speed: SI = 25, US = 1280.

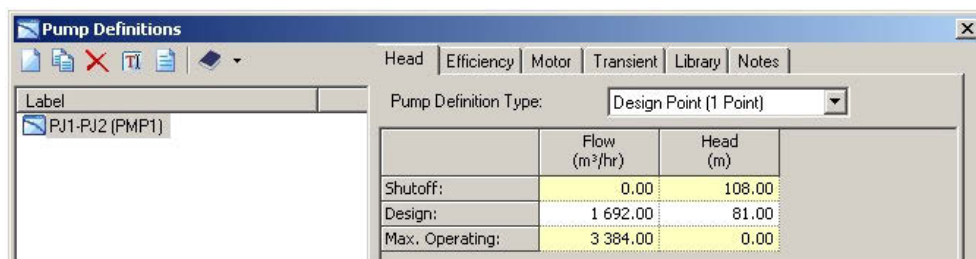


Рис. 14.14. Характеристика насоса

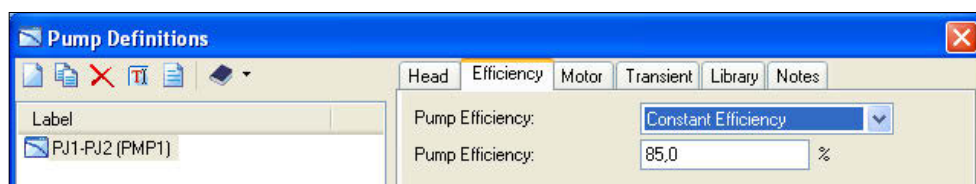


Рис. 14.15. КПД насоса

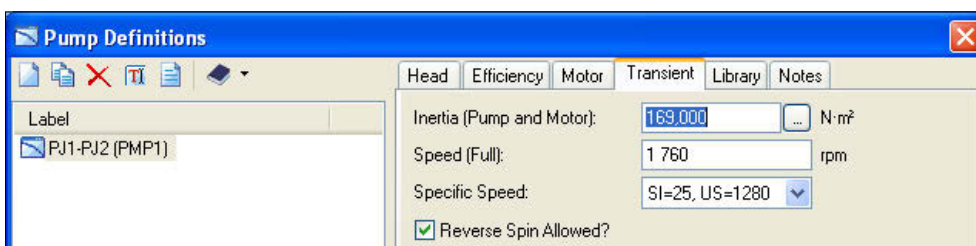



Рис. 14.16. Параметры для расчета переходного процесса в насосе

Пункт *Reverse Spin Allowed?* в нашем случае нужно отметить, тем самым разрешается изменение направления вращения рабочего колеса.


Теперь все необходимые данные введены и можно приступить к расчету. Убедитесь, что сценарий *Existing System* является текущим и активизируйте пункт меню **Analysis – Compute Initial Conditions** для расчета начальных условий при нормальной работе сети, которые будут основой для расчета гидравлического удара.

После завершения этих расчетов откроется окно *Calculation Summary*. Сообщения об ошибках, если они обнаружены, и предупреждения отображаются в нижней части окна *Calculation Summary*. Если ошибок не обнаружено, нажмите кнопку  – *Compute* или выберите пункт меню **Analysis – Compute**. После завершения

расчетов окна *Transient Calculation Summary* и *User Notification* нужно закрыть, поскольку они содержат лишь справочную информацию.

Просмотр и анализ результатов осуществляется с помощью специального инструмента *Transient Results Viewer*, который позволяет представить результаты в виде графиков или просматривать их в режиме анимации.

Для построения графиков изменения напора и расхода в нагнетательном трубопроводе насоса PMP1D выполните следующие действия.

Нажмите кнопку . В окне *Transient Results Viewer* перейдите на вкладку *Time Histories* и в одноименном пункте окна с помощью меню укажите точку PMP1D:PMP1. Далее нажмите кнопку *Plot* (построить). Результат должен соответствовать рис. 14.17.

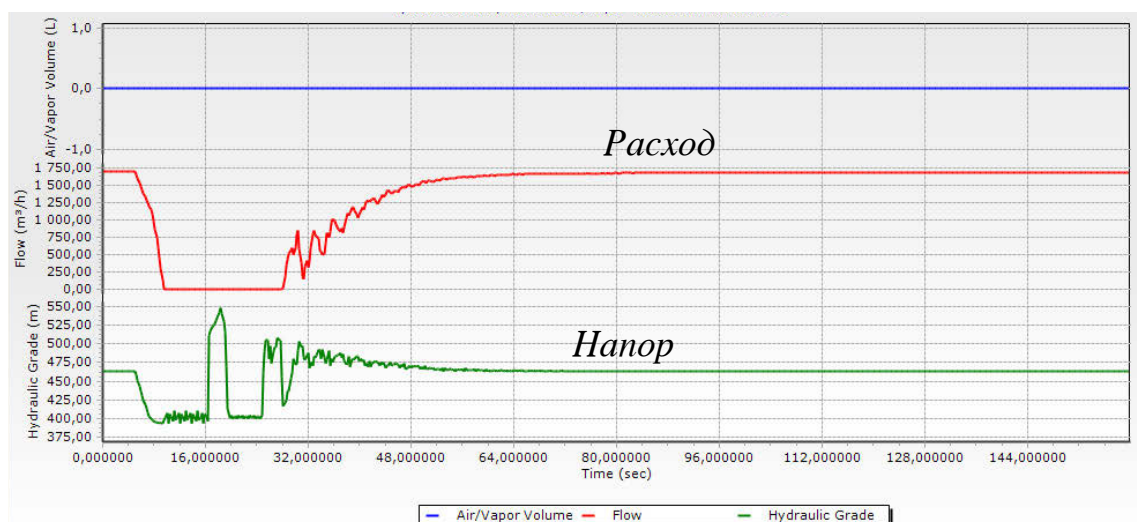


Рис. 14.17. Графики изменения параметров потока у насоса

Для построения графиков изменения максимального и минимального напоров, а также объема газовой фазы в какой-либо цепочке трубопроводов (они были заданы вами ранее) в окне *Transient Results Viewer* перейдите на вкладку *Profiles*. В пункте *Profile* с помощью меню укажите требуемый профиль (например, Path3). Нажмите кнопку *Plot*.

Верхний график на рис. 14.18 показывает, что в трубопроводе вследствие понижения давления возникает кавитация (образуются пары воды). Как и следовало ожидать, она имеет место на выходе из насоса, а также в самой высокой точке сети.



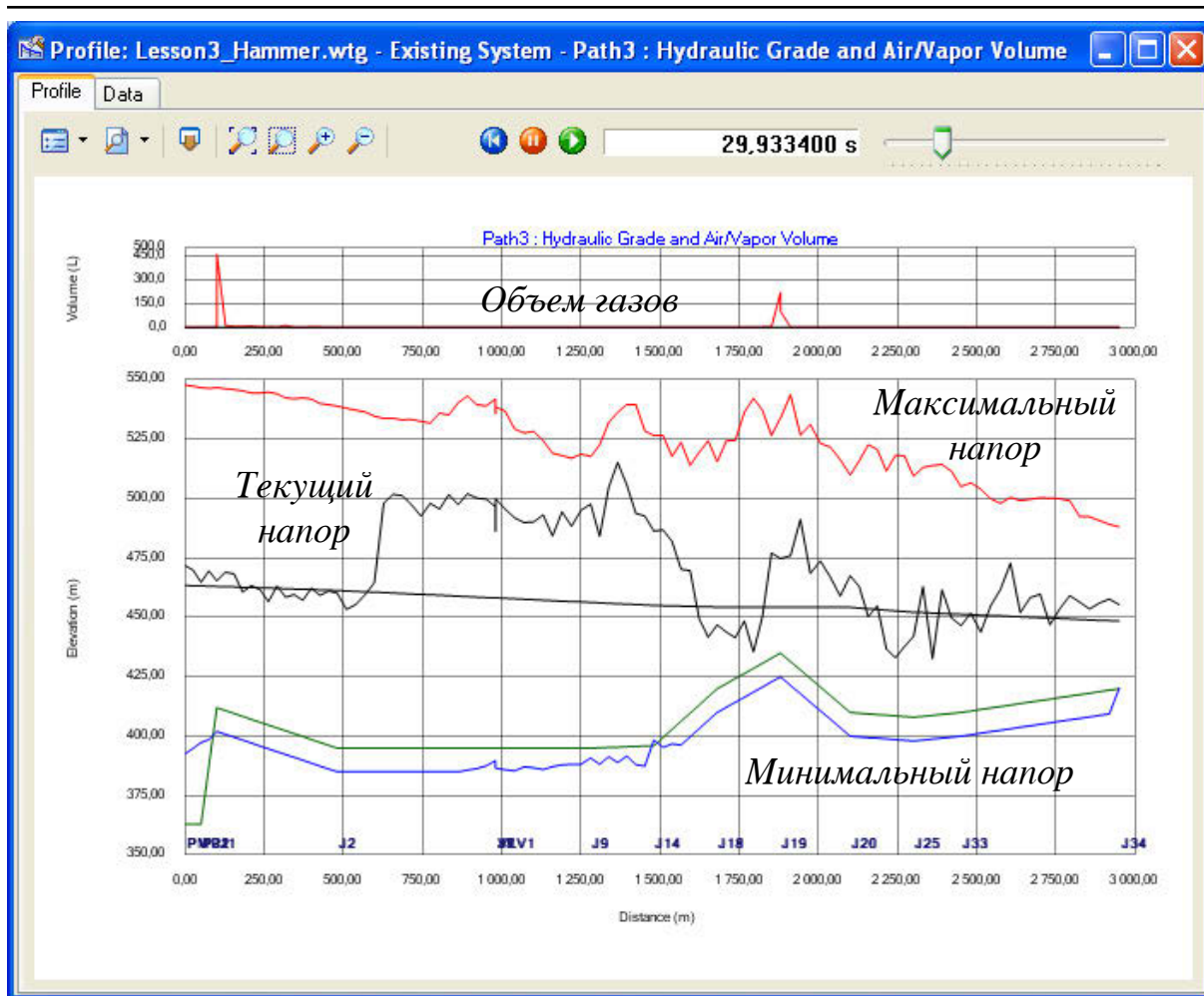


Рис. 14.18. Изменение параметров потока по профилю Path3

Кавитация – крайне нежелательное явление, поскольку может привести даже к разрушению трубопровода под действием внешнего (атмосферного) давления.

С целью защиты от гидравлического удара можно использовать гидропневматический аккумулятор, который устанавливается сразу за насосом. Он позволит уменьшить колебания давления в сети.

Поскольку кавитация наиболее вероятна в самой высшей точке сети, то в ней можно разместить расширительный бак (водонапорную колонну). Предлагаем вам самостоятельно рассмотреть этот способ защиты.



---

## Библиографический список

1. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. В 2 кн. Кн. 1. / Д. В. Штеренлихт. М. : Энергоатомиздат, 1991. 351 с.
2. Абрамов Н. Н. Водоснабжение: учебник для вузов. / Н. Н. Абрамов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1974. 480 с.
3. Строительные нормы и правила. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.02-84\*. М. : Изд-во ЦНТИ, 1995.
4. Computer applications in hydraulic engeneering. Exton : Bentley Institute Press, 2007. 404 p.
5. Advanced water distribution modeling and management. Exton: Bentley Institute Press, 2004. 752 p.
6. Water distribution design and dodeling – Applying WaterCAD and WaterGEMS, Full Version V8 XM/V8i / User's guide [Электронный ресурс]. Exton : Bentley Systems Incorporated, 2008.
7. Hydraulic transient analysis modeling featuring Hammer / User's guide [Электронный ресурс]. Exton : Bentley Systems Incorporated, 2008.

*Учебное издание*

**Некрасов Александр Васильевич**

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Редактор *Т. Е. Мериц*

Компьютерная верстка *А. В. Некрасова, Е. В. Суховой*

Подписано в печать 46.03.2014. Формат 60×90/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 19,5.  
Уч.-изд. л. 14,2. Тираж 70 экз. Заказ № 402.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: [rio@urfu.ru](mailto:rio@urfu.ru)

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: 8 (343) 358-93-06  
E-mail: [press-urfu@mail.ru](mailto:press-urfu@mail.ru)

*Для заметок*

